



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

## MODELO DIFUSO PARA LA EVALUACIÓN DE LA APTITUD ACTUAL Y POTENCIAL DEL MAÍZ DE TEMPORAL EN MÉXICO CON CAMBIO CLIMÁTICO.

### TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA

ANAÏS VERMONDEN THIBODEAU

JURADO EXAMINADOR

- 1) DRA. ANA CECILIA CONDE ÁLVAREZ
- 2) DR. VÍCTOR M. MENDOZA CASTRO
- 3) DR. CARLOS GAY GARCÍA
- 4) MTR. ALEJANDRO MONTERROSO RIVAS
- 5) DRA. ANGELA NEBOT CASTELLS



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Dedicatoria

Dedico esta tesis a mi mamá, papá y hermano quienes me demuestran lo maravilloso que es este mundo. Gracias por su apoyo y cariño que hacen que esta vida sea tan hermosa a su lado.

## Agradecimientos

Son muchas personas especiales a las que me gustaría agradecer que contribuyeron de distintas formas en la terminación de esta tesis, al brindarme su amistad, apoyo, ánimo, guía y conocimientos.

Al Dr. Carlos Gay mi tutor, gracias por tu apoyo, tiempo y confianza. Gracias por introducirme a este mundo difuso en el cual presiento que encontraremos las respuestas para entender mejor esta realidad.

A Dra. Cecilia Conde quien inspiró el tema de la tesis. Gracias por tu apoyo constante, enseñanzas, sugerencias, aportes y correcciones durante el desarrollo de esta tesis. Gracias por integrarme al grupo dos, donde pude desarrollar el tema de la tesis en especial contigo, Alejandro Monterroso y Guillermo Rosales.

A la Dra. Angela Nebot por enseñarme la lógica difusa. Gracias a pesar de la distancia siempre me apoyaste, por la buena compañía y buenos consejos.

A mis sinodales de la tesis, Dr. Carlos Gay, Dra. Cecilia Conde, Dr. Víctor Mendoza, Dra. Angela Nebot y el Mtro. Alejandro Monterroso, quienes no se cansaron de corregir mi tesis.

Al Centro de Ciencias de la Atmósfera y la UNAM, la institución que me formó y me hicieron mejor persona. Donde tuve la oportunidad de desarrollarme profesionalmente y conocer a muchos profesores y amigos con los que sigo compartiendo sueños, aventuras y los momentos de la vida.

Dr. Benjamín Martínez y Mtro. Francisco Estrada, gracias por su amistad, las largas pláticas, buenos consejos y valiosas sugerencias.

También quiero agradecer a esas personas que se han convertido en una parte importante de mi vida, las que me han apoyado, con las que he aprendido, las que me han compartido sus visiones de este mundo, mi familia, la familia adoptiva y los amigos. Gracias. En especial a mis padres que me hacen sentir que en esta vida todo lo puedo lograr gracias, pues sí son los mejores papas del mundo.

Agradezco al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Programa Universitario de Cambio Climático (PINCC) por el apoyo y patrocinio para la realización de este proyecto de tesis.

# Resumen

En esta tesis se desarrolló una nueva metodología para generar un índice de aptitud del maíz de temporal, mostrando una evaluación del potencial actual y futuro bajo condiciones de cambio climático.

La metodología está basada en la lógica difusa. Con base en el conocimiento de expertos se relacionaron las variables mediante las cuales se formularon reglas para hacer una evaluación y obtener el índice.

El índice de aptitud permite hacer una valoración de los factores ambientales (temperatura, precipitación, profundidad de suelo, y pendiente del terreno) que limitan la agricultura del maíz de temporal, una práctica que requiere de pocos recursos y que está ampliamente distribuida en el territorio nacional. Con ello se podrá identificar las áreas que serán más vulnerables al cambio climático.

En general, la superficie del país no tiene una buena aptitud para el maíz de temporal, ya que los desiertos abarcan una gran extensión del territorio nacional. Las zonas con aptitud alta se distribuyen entre la zona noreste del país en Tamaulipas y Nuevo León, así como a lo largo de la Sierra Madre Occidental, en los estados de Sinaloa y Sonora. Hay otras áreas con una aptitud alta de menor extensión en la zona centro del país. Con base en los escenarios de cambio climático para los horizontes 2030 y 2050, de tres modelos: European Centre Hamburg Model ECHAM5/MPI, el Hadley Global Environmental Model UKHADGEM1 y el Geophysical Fluid Dynamics Laboratory GFDL CM 2.0, y para las familias de emisiones A1, A2, B1 y B2, determinadas por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), en general se muestra la tendencia a la reducción de la aptitud de las áreas con una alta aptitud. También en general se proyecta que las zonas de alta aptitud serán de media aptitud, para las otras categorías de aptitud el comportamiento es más variable dependiendo del escenario.

En contraste, para el estado de Puebla, que se encuentra en la zona centro del país, se presenta una mejora en la aptitud para el maíz de temporal, al presentarse mejores condiciones climáticas para su desarrollo.

La aplicación de los métodos difusos presentados en esta tesis brindan una nueva alternativa para la evaluación que puede ser utilizada a distintas escalas espaciales.

# Abstract

This thesis presents a new methodology to generate an index of suitability for rainfed maize actual and potential under climate change scenarios in Mexico.

The methodology is fuzzy logic based. The fuzzy model was built with experts knowledge on the subject to create the rules of behavior to evaluate and generate an index.

The suitability index allows the assessment of environmental factors (temperature, precipitation, soil depth, and slope) which limit the production of rainfed maize, a practice that requires little resources and with a widespread distribution on the national territory. Allowing the identification of the areas more vulnerable to climate change.

The country's territory has a low suitability index for rainfed maize, due to the extension of the deserts. The areas with the highest value of the suitability index are found on the northeastern part of the country in the states of Tamaulipas y Nuevo Leon, also along the Sierra Madre Occidental, in the states of Sinaloa and Sonora. There are other areas with high values in the central part of the country but these are of a minor extension.

Using the time horizons of 2030 and 2050 of the three models European Centre Hamburg Model ECHAM5/MPI, el Hadley Global Environmental Model UKHADGEM1 y el Geophysical Fluid Dynamics Laboratory GFDL CM 2.0, and for the family emissions A1, A2, B1, and B2, determined by the Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC), show a general reduction of the areas with a high value to a medium value index for suitability, for the other categories the results are more variable depending on the scenario.

For the state of Puebla that is located in the central part of the country, there's an increase of suitability for rainfed maize, since the climate conditions improve.

The application of the fuzzy methods presented in this thesis show an alternative for the evaluation that can be used on different scales.

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Objetivos</b>	<b>2</b>
<b>1.2 Aptitud de la tierra</b>	<b>2</b>
1.2.1 Clasificaciones cualitativas o cuantitativas.	3
<b>1.2.2 Clasificaciones de aptitud actual y potencial</b>	<b>3</b>
<b>1.3 Cambio Climático</b>	<b>3</b>
1.3.1 Generación de escenarios de cambio climático regionales para México.	5
<b>1.4 Antecedentes de agricultura y cambio climático en México</b>	<b>8</b>
<b>1.5 Lógica difusa</b>	<b>15</b>
1.5.1 Funciones de membresía	18
1.5.2 Fuzzificación de los datos	20
1.5.3 Operaciones con conjuntos difusos	21
1.5.4 Implicación Difusa	22
1.5.5 Desfuzzificación	23
1.5.6 Antecedentes de la Lógica Difusa Utilizada en el Área de la Agricultura	23
<b>2. Metodología</b>	<b>25</b>
<b>2.1 Características de los Sistemas Difusos con Base en el Conocimiento de Expertos.</b>	<b>25</b>
<b>2.2 El sistema difuso con base en el conocimiento de los expertos para medir la aptitud del maíz de temporal tomando en cuenta únicamente la temperatura y precipitación</b>	<b>26</b>
<b>2.3 El sistema difuso con base en el conocimiento de los expertos para medir la aptitud del maíz temporal</b>	<b>30</b>

<b>3. Resultados</b>	<b>38</b>
<b>3.1 Resultados del modelo difuso tomando en cuenta únicamente temperatura y precipitación</b>	<b>38</b>
3.1.1 Resultados del modelo ECHAM para el horizonte 2050 utilizando solo las variables climáticas.	40
3.1.2 Resultados del modelo GDFL para el horizonte 2050 utilizando solo las variables climáticas.	41
3.1.3 Resultados del modelo HADLEY para el horizonte 2050 utilizando solo las variables climáticas.	43
<b>3.2 Resultados del modelo difuso con las cuatro variables</b>	<b>45</b>
3.2.1 Resultados del modelo ECHAM para el horizonte 2050	48
3.2.2 Resultados del modelo GDFL para el horizonte 2050	49
3.2.3 Resultados del modelo HADLEY para el horizonte 2050	51
<b>3.4 Estudio de caso: Puebla</b>	<b>53</b>
3.4.1 Resultados del modelo ECHAM para el horizonte 2050 para Puebla	54
3.4.2 Resultados del modelo GDFL para el horizonte 2050 para Puebla	55
3.4.3 Resultados del modelo HADLEY para el horizonte 2050 para Puebla	57
3.4.4 Uso de suelo, agricultura temporal.	59
<b>4. Conclusiones</b>	<b>60</b>
<b>5. Anexos</b>	<b>64</b>
<b>5.1 Resultados del modelo difuso tomando en cuenta solo temperatura y precipitación.</b>	<b>64</b>
5.1.1 Resultados de las variables climáticas del modelo ECHAM para el horizonte 2030	65

5.1.2 Resultados de las variables climáticas del modelo GDFL para el horizonte 2030	66
5.1.3 Resultados de las variables climáticas del modelo HADLEY para el horizonte 2030	67
<b>5.2 Resultados del modelo difuso con cuatro variables</b>	<b>68</b>
5.2.1 Resultados del modelo ECHAM para el horizonte 2030	69
5.2.2 Resultados del modelo GDFL para el horizonte 203	70
5.2.3 Resultados del modelo HADLEY para el horizonte 2030	71
<b>5.3 Estudio caso: Puebla</b>	<b>72</b>
5.3.1 Resultados del modelo ECHAM para el horizonte 2030 para Puebla	73
5.3.2 Resultados del modelo GDFL para el horizonte 2030 para Puebla	74
5.3.3 Resultados del modelo HADLEY para el horizonte 2030 para Puebla	75
5.4 Aplicaciones futuras	76
<b>Referencias</b>	<b>89</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>95</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>97</b>

# 1. Introducción

En muchas partes del mundo, y particularmente en México, la superficie de tierra apta para la agricultura se ha ido reduciendo. El incremento en la demanda de productos agrícolas, el uso de técnicas agropecuarias intensivas y por la explosión demográfica que buscan ocupar esas tierras, han causado un deterioro significativo, contaminación y agotamiento de los suelos arables.

El cambio climático tendrá un efecto adicional en los sistemas agroclimáticos, teniendo un impacto en la producción de alimentos. Varios factores influyen en la seguridad alimentaria ya que está no solo depende del sector agrícola, sino que también se ve afectada por cambios en el consumo de la sociedad, precios del petróleo, biocombustibles, entre otros, retos a los cuales hoy se enfrentan las sociedades y que el cambio climático exacerbará.

Actualmente en México se produce el 53% de los productos agrícolas que se consumen, aunque con las ganancias que se obtienen de los productos de exportación se cubren los gastos de importación del 90% de los alimentos para el consumo interno.

La producción agrícola en general está determinada por la interacción entre los métodos de manejo y las condiciones ambientales. Hoy en día es posible compensar las condiciones ambientales adversas y de degradación de suelos haciendo uso de tecnología y energía de manera intensiva, pero estos sistemas de producción son una minoría en el mundo. En México sólo el 26% de la superficie agrícola tiene riego, cosechando el 57% de los alimentos, en su mayoría hortalizas que se exportan. En estas zonas se salinizan 10 000 hectáreas al año. El 48% de la superficie del país se encuentra degradada, la principal degradación es de tipo química, la cual está asociada a la agricultura. El uso de productos químicos está empobreciendo los suelos al disminuir o eliminar la producción biológica del mismo. Al disminuir la productividad de las tierras, se incrementa la presión sobre los recursos naturales llegando a causar conflictos y una mayor degradación (SEMARNAT 2008).

Se debe aumentar la producción agrícola, mejorando la calidad en el alimento y utilizando prácticas ambientalmente amigables. Estas prácticas más “amigables” son por ejemplo la agricultura de precisión, sustentable, orgánica, biointensiva, etc. Los cultivos deben seleccionarse en función de las capacidades y cualidades de cada área.

La **aptitud** de un cultivo se define por los requerimientos necesarios para su crecimiento, las características del suelo, las condiciones climáticas, así como la compensación por medio de distintos suplementos como pueden ser el riego, fertilizantes, pesticidas, sombra, etc.

El maíz es el cereal básico de la dieta mexicana. Además México es el lugar de origen del cultivo. El ciclo de este cultivo define; las labores, rituales y celebraciones de la mayoría de las comunidades, y es un elemento importante de la historia e identidad del país.

La producción de maíz en México representa más de dos tercios del valor neto de la producción agrícola, ocupa la mitad del total de la superficie destinada a todos los cultivos, y 18 millones de personas trabajan en este cultivo (Nadal et al. 2004). Por lo anterior, una evaluación del maíz de temporal se vuelve una cuestión de suma importancia para el país, así como el cambio de esta evaluación con los distintos escenarios de cambio climático.

## 1.1 Objetivos

El objetivo de esta tesis es desarrollar un modelo difuso para la evaluación de la aptitud del maíz de temporal en México, con base en los trabajos realizados en el país. Estos trabajos son la Primera Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, reproducido del trabajo “México: Una visión hacia el siglo XXI. El Cambio Climático en México” en el capítulo VI (Conde et al. 2000), al igual que el trabajo realizado en la Tercera Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (Monterroso et al. 2006) y en el trabajo presentado en el volumen 24, número 1 de la revista atmósfera (Monterroso et al. 2009).

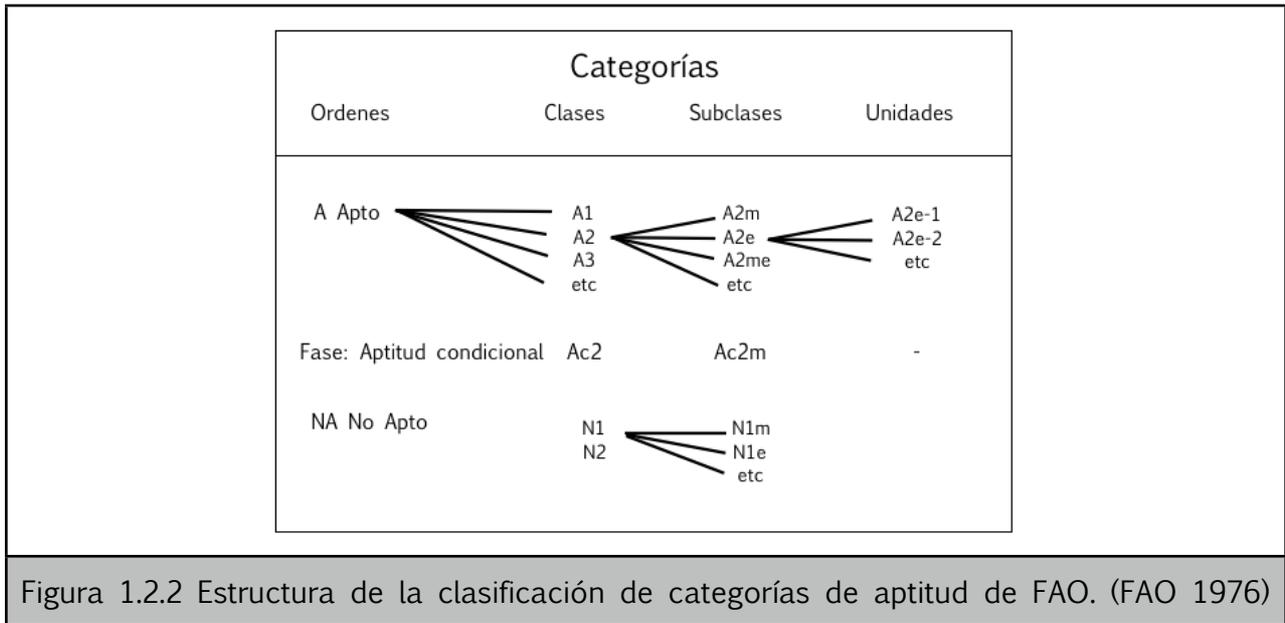
El modelo será construido con base en el conocimiento de expertos. Esta metodología de lógica difusa se ha implementado tanto para la evaluación de la marginalidad del uso de tierra para la agricultura de manera global (Cassel-Gintz et al. 1997), así como regional en Benin (Röhrig 2008), y de manera específica para distintos cultivos con base en el conocimiento de los agricultores locales (Sicat et al. 2005) y con métodos de multicriterio (Prakash 2003) en distintos distritos de la India.

## 1.2 Aptitud de la tierra

En general la aptitud de la tierra es la capacidad de un tipo de terreno para un uso determinado. El terreno puede ser considerado en su condición presente o después de hacerle mejoras (FAO 1976). La aptitud de la tierra puede ser categorizada por medio de la estructura propuesta por la FAO como se muestra en la tabla 1.2.1.

Tabla 1.2.1 Categorías de aptitud de FAO. (FAO 1976)	
1. Ordenes de aptitud de la tierra:	Reflejando tipos de aptitud
2. Clases de aptitud de la tierra:	Reflejando grados de aptitud dentro de las ordenes
3. Subclases de aptitud de la tierra:	Reflejando tipos de limitaciones, o tipos de mejoras necesarias dentro de las clases
4. Unidades de aptitud de la tierra:	Reflejando diferencias menores en los requerimientos de manejo dentro de las subclases

Las clasificaciones de aptitud pueden ser cualitativas o cuantitativas y puede referirse a las condiciones actuales o potenciales. Cada clasificación es una agrupación de unidades de terreno con base en su aptitud para un uso definido. Se trata de un esquema, no un sistema de evaluación de tierras. El orden de aptitud (ver figura 1.2.2) expresa si una unidad es apta o no para el uso determinado (A o NA). Las clases hacen referencia a los grados de aptitud, altamente apta (A1), moderadamente apta (A2) y marginalmente apta (A3); el no apto, consta de las clases no apta actualmente (N1) y no apta permanentemente (N2). Las subclases indican el tipo de limitación presente, y se muestra con la letra a continuación (A2m, A2e). Con las unidades de aptitud se expresan variaciones de la subclase debido a su producción o por exigencias de manejo, las cuales se expresan con un número arábigo precedido por un guión (A2m-1).



### 1.2.1 Clasificaciones cualitativas o cuantitativas.

Una clasificación cualitativa expresa la aptitud relativa sin cálculos precisos. Están basados en el potencial productivo del terreno, usado en estudios de reconocimiento de grandes áreas.

La clasificación cuantitativa de las clases están definidas por términos numéricos permitiendo una comparación objetiva entre ellas relacionando distintos usos de suelo. Por lo general se usan criterios económicos. Estas clasificaciones se aplican en proyectos específicos.

Las evaluaciones cualitativas permite la integración intuitiva de varios aspectos sociales, ambientales, hasta económicos como los beneficios. Esto se pierde en las evaluaciones cuantitativas.

### 1.2.2 Clasificaciones de aptitud actual y potencial

La aptitud actual puede ser definida para la condición del uso actual del suelo, con o sin mejores prácticas de manejo u otro uso.

La aptitud potencial se define para alguna condición en una fecha futura, como resultado de alguna aplicación como podría ser la instalación de un esquema de irrigación. En este estudio tomamos la aptitud potencial la que resultara con el uso de las salidas de modelos de cambio climático.

## 1.3 Cambio Climático

De acuerdo con el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en ingles, 2007) el “cambio climático” se refiere a cualquier cambio en el tiempo del clima, debido a la variabilidad natural o como resultado de la actividad humana la cual altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables. La causa de este cambio climático, ciertamente son atribuidos a forzamientos naturales, y muy recientemente,

según el IPCC, es muy probable que se deba a la actividad humana que desde la revolución industrial a emitido estos gases efecto invernadero (GEI) por la quema de combustibles fósiles y la deforestación, aumentando así su concentración en la atmósfera. Al aumentar los GEI el efecto invernadero es más eficiente.

El efecto invernadero se da por gases capaces de acumular energía calorífica presentes en la atmósfera; el vapor de agua (H<sub>2</sub>O), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), ozono (O<sub>3</sub>) y en tiempos reciente los clorofluorcarbonos (CFCs). Estos gases son transparentes a la luz solar, por ello alcanzan llegar a la superficie de la Tierra y la calientan. Al calentarse la superficie esta emite la energía en forma de radiación de onda larga (infrarroja) la cual es absorbida por estos GEI. Esta absorción hace que aumente la temperatura, provocando que la Tierra tenga una temperatura promedio de 15°C. Si no existiera este efecto, la Tierra estaría a -15°C dificultando la vida. Antes de la revolución industrial el nivel de concentración del CO<sub>2</sub> era de 280 ppm (partes por millón) y ahora esta en 380 ppm, pero si se toma en cuenta la equivalencia de los otros GEI se tiene 430 ppm.

Se ha incrementado la temperatura promedio del planeta 0.74°C en los últimos 100 años. En el 2000 se publico el Special Report on Emissions Scenarios (Nakicenovic et al. 2000) representando la tercera generación de escenarios de emisiones utilizados por el Panel. Para la elaboración de escenarios para el periodo 2000-2100, se definieron cuatro líneas evolutivas A1, A2, B1, y B2 de los posibles desarrollos globales y regionales que podrían ocurrir en los próximos 100 años. Algunas de las características principales de desarrollo futuro que progresan de manera diferente en cada una de las líneas evolutivas son:

- Tipo de desarrollo demográfico global y regional.
- Grado en el que la globalización económica y las interacciones sociales y culturales continúan durante el siglo XXI.
- Tasa de desarrollo económico global y regional y patrones de comercio en relación con otras características de la línea evolutiva.
- Tasas y dirección del cambio tecnológico global y regional.
- Grado en el que los recursos humanos y naturales son movilizados global y regionalmente para alcanzar objetivos de desarrollo múltiples en cada línea evolutiva.
- Balance entre objetivos económicos, sociales, tecnológicos y ambientales en las elecciones realizadas por los consumidores, empresas, gobiernos y otros actores.

Familia A1: Describe un mundo futuro de crecimiento económico muy rápido; la población mundial alcanza su nivel más alto a mitad de siglo y disminuye posteriormente, produciendo una rápida introducción de nuevas tecnologías más eficaces. Los factores subyacentes importantes son la convergencia entre las regiones, la capacitación y mayores interacciones culturales y sociales, y una importante reducción de las diferencias regionales en los ingresos per cápita.

Familia A2: Describe un mundo muy heterogéneo. La característica subyacente es la autosuficiencia y preservación de las identidades locales. Los perfiles de fertilidad en las distintas regiones tienden a converger muy lentamente, lo cual acarrea un aumento permanente de la población. El desarrollo económico tiene una orientación regional y crecimiento económico per cápita, y el cambio tecnológico esta más fragmentado y es más lenta la evolución que en otras líneas evolutivas.

Familia B1: Es un mundo convergente, con una población mundial que alcanza su nivel más alto a mediados del siglo para ir disminuyendo de forma similar a la línea evolutiva del A1. Pero se muestran cambios rápidos en las estructuras económicas hacia una economía de la información y de los servicios, con reducciones en el consumo de materiales e introducción de tecnologías limpias y recursos eficaces. Es un desarrollo económico sustentable, social y ambiental que comprende una mejora de la equidad.

Familia B2: Es un desarrollo regional para alcanzar la sustentabilidad económica, social y ambiental. La población crece continuamente pero no a la velocidad del A2, con niveles medio de desarrollo económico, cambios tecnológicos menos rápidos y más variados que las líneas B1 y A1. Pero el escenario está más orientado a la protección ambiental y equidad social, y se centra en los niveles local y regional.

El escenario B1 ya es obsoleto el día de hoy ya que las emisiones han sido superadas, pero se sigue usando como referencia por trabajos anteriores, además que puede ser utilizado como un escenario de estabilización a 550ppm, ya que ningún escenario actualmente incluye acciones de mitigación. El A1B se utiliza para representar un escenario de estabilización a las 750ppm y el B2 como a 650ppm ((IPCC-WGII 2007), (Swart et al. 2002)). El A2 representa una línea de emisiones alta y no tiene ninguna similitud con un escenario de estabilización. Los escenarios son elementales para la el desarrollo de estrategias de adaptación y mitigación ante el cambio climático, recomendado por el “Grupo de trabajo sobre Datos y Apoyo para las Evaluaciones de Impactos y Adaptación, del IPCC (IPCC-TGICA 2007). También se deben de tomar en cuenta las propuestas que surgen de los resultados obtenidos por el Grupo I del IPCC (IPCC-WG1 2007).

En los estudios de cambio climático se utilizan distintos modelos de clima y un conjunto de escenarios de emisiones para reflejar el rango de incertidumbre causadas por las distintas suposiciones adoptadas (cambio en las emisiones de GEI, cambio tecnológico, tipo y grado de desarrollo económico, etc.). De esta manera se puede representar las distintas alternativas de como podría comportarse el clima futuro.

Es necesario analizar que consecuencias tendrá este calentamiento en el clima a escalas regionales y locales, así como las implicaciones que tendrá en todos los aspectos en el desarrollo de nuestro país.

### **1.3.1 Generación de escenarios de cambio climático regionales para México.**

Se utilizaron los resultados obtenidos en la Guía para la Generación de Escenarios de Cambio Climático a Escala Regional (Conde et al. 2008). Esta guía utiliza las salidas de los modelos de Circulación General (GCM, por sus siglas en inglés) de atmósfera y océano acoplados (AOGCMs), que son 23 los reportados en el cuarto informe 4AR del IPCC (IPCC-WG1 2007). Estos modelos están basados en las leyes fundamentales de la física, y simulan una gran variedad de procesos que ocurren en distintas escalas espaciales y temporales, entre los diversos subsistemas climáticos. Ahora los modelos tienen una resolución de hasta 0.5°x0.5° que permiten el análisis a escalas regionales. Se puede ver en la figura 1.3.1.1 la evolución espacial que han tenido los modelos a lo largo que los reportes del IPCC.

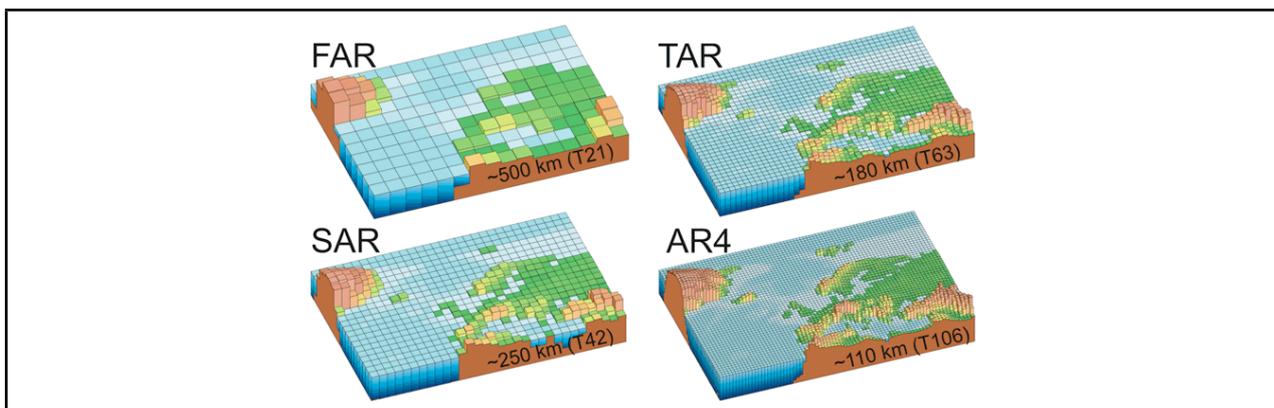


Figura 1.3.1.1 Características de la resolución geográfica de las distintas generaciones de modelo utilizados en los reportes del IPCC: FAR (IPCC, 1990), SAR (IPCC, 1996), TAR (IPCC, 2001a), y AR4 (2007). No se muestra la resolución vertical pero es comparable a la resolución horizontal de los modelos. (IPCC-WG1 2007)

Las variables de temperatura de superficie y precipitación son las de mayor importancia y por lo general se llegan a proyectar hasta el 2100.

Para algunos estudios la información proveniente de los AOGCMs puede ser suficiente dependiendo de la escala, pero en algunos casos se deben aplicar las técnicas de regionalización. Para ello se debe asimilar los factores de gran escala que aportan AOGCMs y los factores regionales y locales que no están resueltos por el modelo. Los métodos empleados pueden ser:

- Modelos de circulación general de alta resolución
- Modelos regionales o modelos anidados de área limitada (RCMs, por sus siglas en ingles)
- Los métodos empíricos-estadísticos o estadísticos dinámicos

Cuando se reduce la escala tanto temporal como espacial se incrementa la incertidumbre.

Para la elaboración de escenarios se usan los escenarios de emisiones de GEI y las posibles condiciones de desarrollo global, los cuales se mencionaron anteriormente. Con ello se puede calcular la concentración de los mismos y el forzamiento radiativo correspondiente, lo cual lleva a una proyección en el incremento de temperatura. Estas proyecciones globales indican un incremento de temperaturas en el intervalo de 1.8 a 4.0°C sin descartar que aumentara a 6.4°C en los próximos 100 años, esto refleja el rango de incertidumbre causado por las diferentes suposiciones que se adoptan en cuanto a las emisiones de GEI, cambio tecnológico, población, tipo y grado de desarrollo económico, etc.

Algunos trabajos lo han resuelto utilizando el método frecuentista de probabilidades pero como los modelos tienen una falta de independencia entre sí, debido a la existencia de 'familias de modelos', al uso de estrategias de modelación y bases de datos similares, complica la interpretación. Debido a esta falta de independencia no se puede pensar que los sesgos individuales de los modelos se cancelen por lo que el uso de medias y medianas no proveerían mejores estimaciones. Este tipo de análisis a nivel regional lleva enmascaramiento de los resultados, eliminando escenarios pesimistas que podrían representar mayores retos.

De las consideraciones más relevantes en la metodología del IPCC-TGICA se sugiere que los escenarios de cambio climático regionales deben cumplir con las siguientes características:

- Consistencia a nivel regional con las proyecciones globales.
- Plausibilidad física y realismo.
- Información apropiada para las evaluaciones de impactos (en cuanto a su resolución, horizonte y variables).
- Representatividad espacial. La más alta resolución generalmente la tiene la última generación de modelos.
- Validez, que reproduzcan el clima observado en lo posible.
- Representatividad de sus resultados (que se muestren rangos de los posibles cambios futuros).
- Comparabilidad con estudios anteriores.
- Ser útiles en los estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación.

En este trabajo los modelos que se escogieron fueron los que se utilizaron en la cuarta (CICC 2009) comunicación de México los cuales satisfactoriamente cumplieron de mejor manera con los requisitos listados anteriormente. Además de cumplir con otros criterios; Primero se verificó cuáles eran los modelos que reproducían mejor el clima observado (IPCC-TGICA 2007). Esta evaluación tiene la debilidad que no garantiza que si el modelo reproduce bien el pasado que reproducirá bien el clima futuro. El modelo tenía que reproducir tanto el clima global pasado como el de México. Esto se verificó con el uso de estadísticos, los cuales fueron correlación de patrones ( $r$ ), la raíz del error cuadrático medio (RMSE), sesgo y raíz del error cuadrático medio corregida por sesgo (RMSE-corr), pesados con coseno para tomar en cuenta el cambio en el área por cuadro en la malla dependiendo de la latitud. El siguiente criterio que se tomó a consideración fue la resolución espacial. También importante que contara con las corridas para los cuatro escenarios de emisiones. Al tomar en cuenta el criterio de representatividad (IPCC-TGICA 2007) se escogieron tres modelos que fueran capaces de representar un rango de incertidumbre, es decir posibles aumentos de temperatura pero más importante que proporcionaran tanto incrementos como reducciones en la precipitación. Se eligieron los tres modelos de circulación general; European Centre Hamburg Model ECHAM5/MPI, el Hadley Global Environmental Model UKHADGEM1 y el Geophysical Fluid Dynamics Laboratory GFDL CM 2.0.

En la tabla 1.3.1.1 se muestran algunas de las características de los AOGCMs, los nombres de los modelos, de los patrocinadores, la presión en la parte superior del modelo, la resolución vertical y horizontal del modelo atmosférico y oceánico, la coordenada vertical oceánica y la condición en superficie (superficie libre o rígida). Las características de la dinámica/estructura del hielo marino (Reología vs. Desplazamiento libre y la inclusión de cuerpos de agua dentro de las cubiertas de hielo (flotante)), los ajustes del tiempo meteorológico del momentum en superficie, calor o flujos de agua dulce aplicados en el acoplamiento a la atmósfera, océanos y componentes del hielo marino. Las características de la tierra como la representación de la humedad de suelo (cubeta, solo una capa vs. varias capas) y la presencia de vegetación (cubierta) y el encaminamiento por el paso de un río también están expuestos. Así como las referencias que describen estos aspectos.

Tabla 1.3.1.1 Datos de los tres modelos utilizados, (IPCC-WGI 2007)						
Modelo	Patrocinador (es) , País	Resolución del tope de la atmósfera <sup>a</sup> , referencias	Resolución <sup>b</sup> Océánica, CoordZ, Tope BC, Referencias	Dinámica Hielo marino, inclusiones de hielo flotante, Referencias	Acoplamiento de ajustes en el flujo, Referencias	Tierra, Suelo, Plantas, encaminamiento, referencias
ECHAM5 / MPI-OM, 2005	Max Planck institute for Meteorology, Germany	Top=10hPa, T63 (1.9°x1.9°) L31, (Roeckner et al. 2003)	1.5°x1.5° L40 profundidad, superficie libre, (Marland et al. 2003)	Reología, flotante, (Hibler 1979); (Semtner 1976)	sin ajustes, (Jungclaus et al. 2006)	Cubeta, cubierta, encaminamiento, (Hagemann 2002); (Hagemann et al. 2001)
GFDL-CM2.0, 2005	U.S. Department of Commerce/ National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) / Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), USA	Top=3hPa, 2°x2.5° L24, (GFDL-GAMDT 2004)	0.3°-1.0°x1.0° profundidad, superficie libre, (Gnanadesikan et al. 2004)	Reología, flotante, (Winton 2000) (Delworth et al. 2006)	sin ajustes, (Delworth et al. 2006)	Cubeta, cubierta, encaminamiento, (Milly et al. 2002); (GFDL-GAMDT 2004)
UKMO - HadGEM1, 2004	Hadley Centre for Climate Prediction and Research/Met Office, UK	Top=39.2km, -1.3°x1.9° L38, (Martin et al. 2004)	0.3°-1.0° x 1.0° L40 profundidad, superficie libre (Roberts 2004)	Reología, flotante, Hunke and Dukowicz, 1997; (Semtner 1976); (Lipscomb 2001)	sin ajustes, (Johns et al. 2006)	Cubeta, cubierta, encaminamiento, (Essery et al. 2001); (Oki et al. 1998)

a Resolución horizontal esta expresada ya sea en grados de longitud por latitud o como truncación espectral triangular (T) con una equivalencia aproximada a grados de latitud y longitud. La resolución vertical (L) es el numero de capas verticales.

b Resolución horizontal esta expresada en grados de latitud y longitud, mientras que la resolución vertical (L) esta expresada en capas.

Para este estudio se cuenta con un escenario base de la climatología observada para el periodo 1950-2000 y los horizontes 2030 y 2050 de los tres modelos de circulación general el European Centre Hamburg Model ECHAM5/MPI, el Hadley Global Environmental Model UKHADGEM1 y el Geophysical Fluid Dynamics Laboratory GFDL CM 2.0 a una alta resolución de 10x10 km, (Conde 2008). Para estos escenarios se uso la versión 5.3 del software MAGICC-SCENGEN (UCAR 2007). Los modelos de alta resolución 1x1km fueron preparados siguiendo la metodología empleada por Hijmans (Hijmans et al. 2005), tanto para los mismos modelos (AOGCM), los distintos escenarios de emisiones (SRES), variables y proyecciones. Los incrementos usados para elaborar estos escenarios son los mismos que los obtenidos de MAGICC/SCENGEN v 5.3 (UCAR 2007) y superpuestos en una rejilla de 10 km x 10 km y de mayor resolución de 1km x 1km, en esta resolución se puede hacer que concuerden con los datos de las pendientes, utilizados en este trabajo.

## 1.4 Antecedentes de agricultura y cambio climático en México

En la primera comunicación nacional ante la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático (Conde et al. 1999), se utilizó el modelo CERES-MAIZE (Jones et al. 1986) para simular rendimientos en la producción de maíz de temporal con

distintas formas de administración del cultivo y diferentes condiciones de clima, semillas y suelos, donde se podía simular las nuevas condiciones del clima por el cambio climático ( $\pm 2,4^{\circ}\text{C}$  y  $\pm 10,20\%$  de lluvia) y las implicaciones que tendría en la producción. Una vez teniendo los datos, para reducir el impacto en los rendimientos se propusieron medidas de adaptación las cuales fueron analizadas sobre una base simple de costo-beneficio. Este análisis se hizo para siete sitios situados en los estados de Puebla, Veracruz, Jalisco y el Estado de México de la República Mexicana donde había la mayor producción de maíz de temporal.

La evaluación de Flores et al. (1999) se basó en rangos óptimos de temperatura y precipitación para la producción de maíz de temporal, generando mapas agroclimáticos teóricos (aptitud potencial) de las regiones aptas para la producción de primavera-verano. Este estudio generó mapas de aptitud de maíz. Se construyeron con base en los límites de tolerancia del maíz, señalado por Wilsie desde 1956 (Wilsie 1956) (ver tabla 1.4.1). Cuando estos límites se aumentan o disminuyen, provocan un decremento en el desarrollo de la planta o su muerte.

Tabla 1.4.1 Rango de los límites de tolerancia. (Wilsie 1956)		
Límite mínimo de distribución	Oscilación del valor óptimo o centro de distribución	Límite máximo de distribución
Ausente		Ausente
Disminución		Disminución
	Escala para cualquier factor	

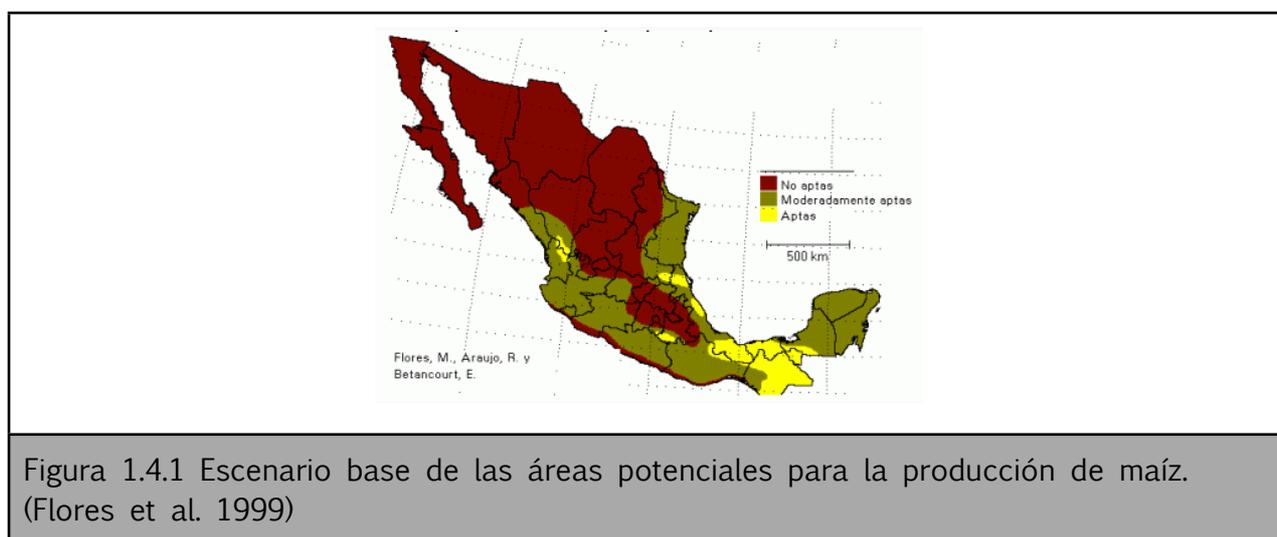
Se tomaron tres valores para el maíz, mínimo, óptimo, y máximo. Se tomaron los siguientes intervalos: los valores mínimos entre  $10-20^{\circ}\text{C}$ , los óptimos entre  $20-30^{\circ}\text{C}$ , y los valores máximos entre  $30-40^{\circ}\text{C}$ . Pero estos varían un poco dependiendo de la etapa de crecimiento:

Tabla 1.4.2 Requerimiento de temperatura en el ciclo fenológico del maíz. Centro de investigación agrícola. Morelia, Mich. INIA,SARH,(Sánchez 1983).			
Subperiodos fenológicos	Requerimientos térmicos ( $^{\circ}\text{C}$ )		
	Mínimo	Óptimo	Máximo
1. Germinación	10	20-25	40
2. Crecimiento Vegetativo	15	20-30	40
3. Floración	20	20-30	30
4. Formación de fruto: estado lechoso y masoso	20	20-30	30
5. Madurez	20	20-30	30

Los requerimientos de precipitación varían entre 400-500 mm el mínimo, entre 500-1000 mm es óptimo, y por encima de 1000mm el máximo.

Tabla 1.4.3 Requerimiento de precipitación en el ciclo fenológico del maíz. (SEP 1983)			
Subperiodos fenológicos	Requerimientos hídricos (mm)		
	Mínimo	Óptimo	Máximo
Total ciclo vegetativo	400-500	500-1000	>1000
1. Germinación	-	45	-
2. Crecimiento Vegetativo	-	170	-
3. Floración	-	220	-
4. Formación de fruto: estado lechoso y masoso	-	215	-
5. Madurez	-	90	-

Solo se tomaron los datos de los meses de mayo a octubre. Con las variables se muestran los mapas de aptitud para cada etapa y se sobrepusieron para delimitar las zonas que tuvieran las condiciones para el maíz expuestas en la tabla 1.4.3 durante los seis meses. Los modelos de circulación que se usaron fueron el GFDL-R30 y el Canadian Climate Center CCC. Los resultados se muestran en la figura 1.4.1.



Se revela que el 59.6% del país no es apto para la producción del maíz de temporal. Esta proporción está compuesta por las zonas áridas y semiáridas del norte, noroeste y centro de México. Un 32.8% es moderadamente apto y solo el 7.6% que se localizan en algunas regiones de Veracruz, Oaxaca, Tabasco y Chiapas son aptas para el cultivo.

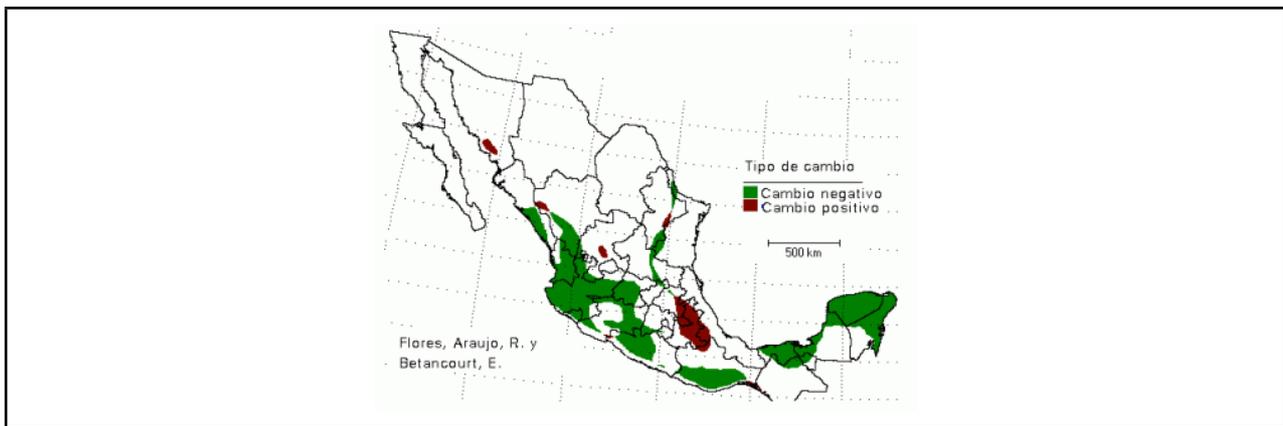


Figura 1.4.2 Áreas de producción de maíz de temporal vulnerables al cambio climático usando el Modelo GFDL-R30. (Flores et al. 1999)

Los resultados que obtuvo en este estudio muestran un incremento de las áreas no aptas se deberá en gran medida a la pérdida de la superficie moderadamente apta. En cambio en la zona centro se ve un aumento en aptitud por el aumento de las temperaturas en las tierras altas (ver figura 1.4.2) de acuerdo a los cambios proyectados con uso del modelo GFDL-R30. Usando los resultados de el modelo CCC, también se observa una pérdida de las tierras moderadamente aptas a no aptas, y cambios positivos por el incremento de temperaturas en tierras altas (ver figura 1.4.3).

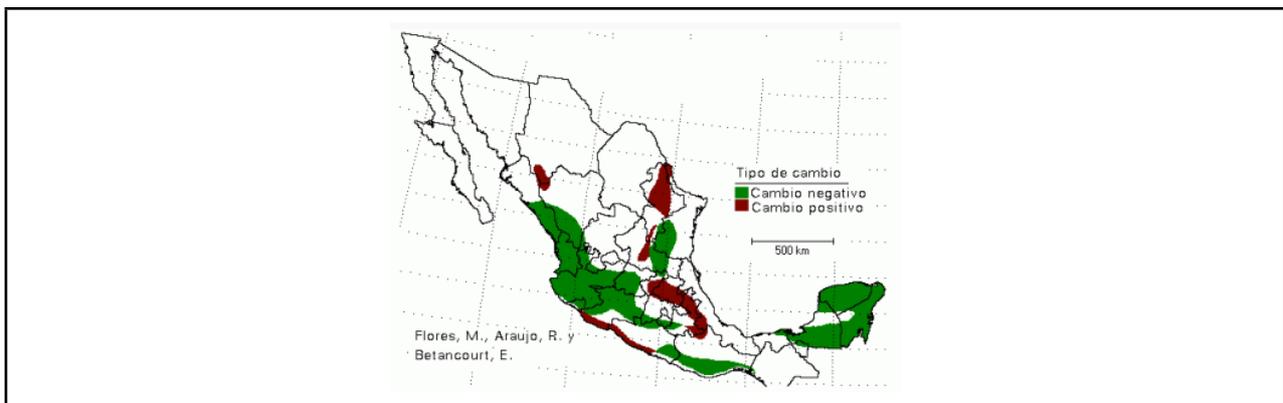


Figura 1.4.3 Áreas de producción de maíz de temporal vulnerables al cambio climático usando el Modelo CCC. (Flores et al. 1999)

En la tercera y cuarta comunicación de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático se utilizó la metodología del factor limitante. El factor limitante es la componente del medio que cuando se encuentra en baja o alta magnitud impide un aumento en la densidad o la existencia de un determinado organismo. Estas componentes pueden ser variables climáticas, físicas, ambientales, es decir cualquier componente necesaria para el desarrollo del organismo. La metodología se describe en el artículo “Assessing actual and potencial rainfed maize suitability under climate change scenarios in Mexico”, (Monterroso Rivas et al. 2009), donde los factores limitantes para el crecimiento del maíz temporal ya estaban definidos. Estos factores se determinan al complementar las variables ecológicas y como la especie las necesita para poder desarrollarse. Al comparar los factores se tendrán las zonas potenciales de distribución para la especie, con los niveles de aptitud categorizados.

Con base en el análisis de los niveles de aptitud para el maíz de temporal en el país de acuerdo a los requerimientos agroclimatológicos y ambientales señalados por (Gómez et al. 2002), (Sys et al. 1991), (FAO 1994), (Otriz-Solório 1987), (Castañeda 1990) y (Flores et al. 1999) los autores anteriores Monterroso et. al. (2009) elaboraron la tabla 1.4.4. En esta tabla se señala los requerimientos ambientales asociados a la fenología del maíz de temporal, en particular para las condiciones de México. Los valores se expresaron en rangos y los agruparon en cuatro categorías: Apto, Moderadamente Apto, Marginalmente Apto y No Apto.

**Tabla 1.4.4 Requerimientos agroclimáticos para el maíz criollo y de temporal en México.**  
Fuente: Monterroso et. al. (2009)

Requerimientos		TIPO DE APTITUD *						
		NA	mma	MA	A	MA	mma	NA
Temperatura (°C)	Media del ciclo	<14	14-18	18-22	22-26	26-32	32-39	>40
	Mínima del ciclo	<7	7-12	12-16	16-18	18-24	24-30	>30
Precipitación (mm)	Total del ciclo	<300	300-500	500-600	600-900	900-1200	1200-1600	>1600
	1er Mes	<60	60-100	100-125	125-220	220-295	295-475	>475
	2do Mes	<70	70-150	150-175	175-235	235-310	310-475	>475
	3er Mes	<70	70-150	150-175	175-235	235-310	310-475	>475
	4to Mes	<60	60-80	100-125	125-210	210-285	285-475	>475
Topografía	Pendiente (%)	<30	16-30	8--16	0-8	8--16	16-30	>30
Suelos	Profundidad (cm)	<20	20-75	75-100	>100	75-100	20-75	<20
Periodo de Crecimiento (días)	Tropical	<90	90-119	120-149	150-224	225-284	285-365	
	Templado	<150	150-164	165-209	210-284	285-329	330-365	

\* NA = no apto, mma = marginalmente apto, MA = moderadamente apto y A = apto.

Las variables climáticas que se utilizaron para estimar la aptitud del cultivo de maíz fueron las temperaturas medias anuales y la precipitación total anual tomadas de (Conde et al. 2008) ambas para el promedio 1960-1990 para la tercera comunicación y 1950-2000 para la cuarta comunicación. El mapa topográfico de pendientes fue elaborado a partir del Modelo de Elevación Digital del terreno (INEGI 2000) así como el mapa de profundidad del suelo (INEGI 1998).

Mediante el Sistema de Información Geográfica ArcView (ESRI 2006) se sobrepusieron los mapas temáticos antes señalados (temperatura media, precipitación anual, topográfico, y de profundidad de suelos) con lo cual se generó la tabla 1.4.4 y el mapa base de aptitud de maíz de temporal para México, que se muestra en la figura 1.4.4.

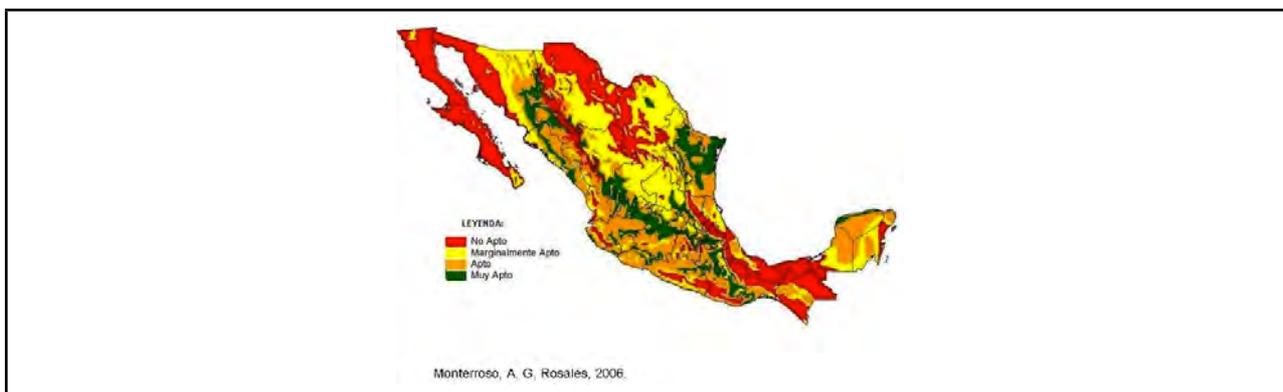


Figura 1.4.4 Mapa base de la tercera comunicación con la climatología 1960-1990. (Monterroso Rivas et al. 2006)

Bajo los escenarios A2 al 2050 (ver figura 1.4.5), se observan unas reducciones en la aptitud para el cultivo, y un incremento de las áreas no aptas. Según el modelo GFDL no habrá cambios de aptitud para el cultivo en aproximadamente 85% del territorio, mientras que los otros dos modelos sugieren que los habrá en poco más del 40%. De acuerdo con lo anterior, los cambios presentados por los modelos difieren respecto en la aptitud futura del maíz: el modelo GFDL permite proyectar que en el 8% del territorio mejora y en otro 6% disminuye su aptitud; el modelo ECHAM estima que la aptitud del territorio aumente del 29% y disminuya su aptitud del 12%. Finalmente, el modelo HADLEY prevé que aumenten las aptitudes en un 13% mientras que disminuyen en 28.5% de la superficie nacional (INE et al. 2006).

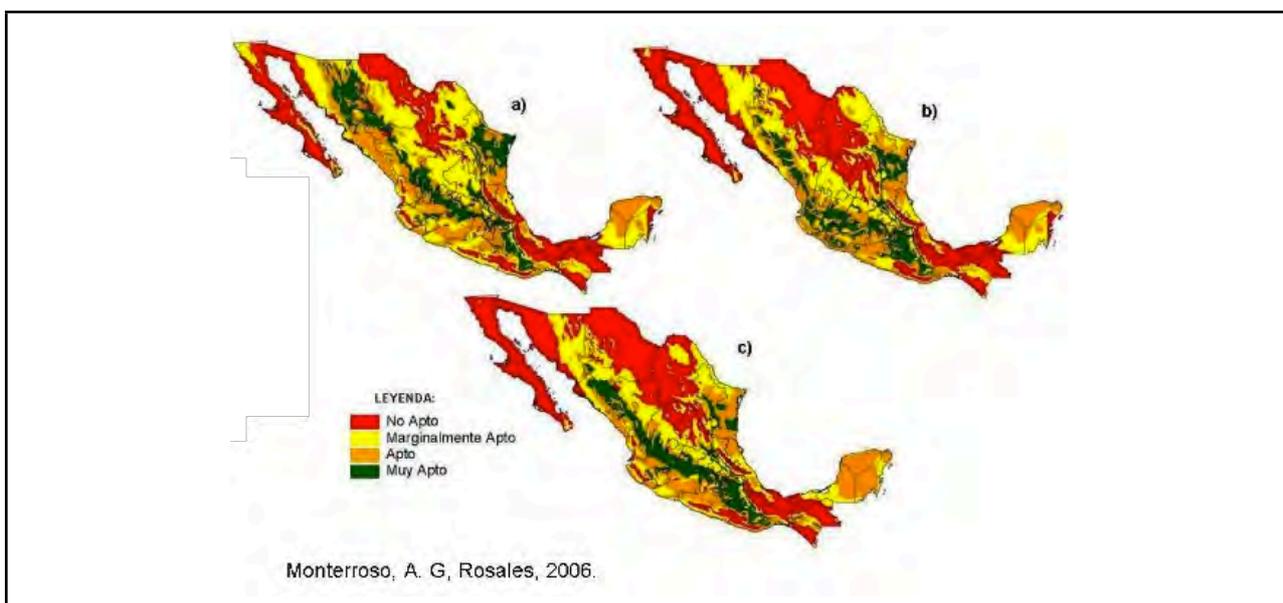


Figura 1.4.5 Aptitud para maíz temporal bajo escenarios A2 de cambio climático para el año 2050. a) GFDL B) ECHAM y c) HADLEY. (Monterroso Rivas et al. 2006)

En la cuarta comunicación para construir el escenario base se usaron los datos referentes al promedio de 1950 a 2000, tanto de la precipitación como de la temperatura (Conde et al. 2008). Para la tercera y cuarta comunicación se hicieron escenarios para el 2050 de las familias A2 y B2, tanto para los modelos GFDL-CM2.0,

UKHADGEM1 y ECHAM5/MPI. En el escenario base se tiene que un 63.1% de la superficie nacional presenta algún grado de aptitud para el cultivo del maíz; un 6.2% de la superficie nacional presenta condiciones aptas mientras que en 25.1% y 31.6% hay condiciones moderadas y marginales, respectivamente. Con los modelos aplicados de cambio climático, se encontró que la categoría apta será la más afectada al disminuir su superficie desde un 3% de acuerdo con UKHadley B2 y hasta un 4.3% de acuerdo con ECHAM5/MPI A2. Mientras que la categoría marginalmente apta será la que más superficie nacional ocupe, desde un 33.4% según ECHAM5/MPI A2 y hasta un 43.8% de acuerdo con el modelo GFDL-CM2.0 A2. El modelo ECHAM5/MPI es el que señala las condiciones más graves para el cultivo mientras que el modelo GFDL es el más favorable, ver figura 1.4.6. Lo anterior denota que las condiciones naturales en el país para el cultivo de maíz serán más restrictivas, por lo que es urgente la aplicación de medidas de adaptación (Monterroso et al. 2009).

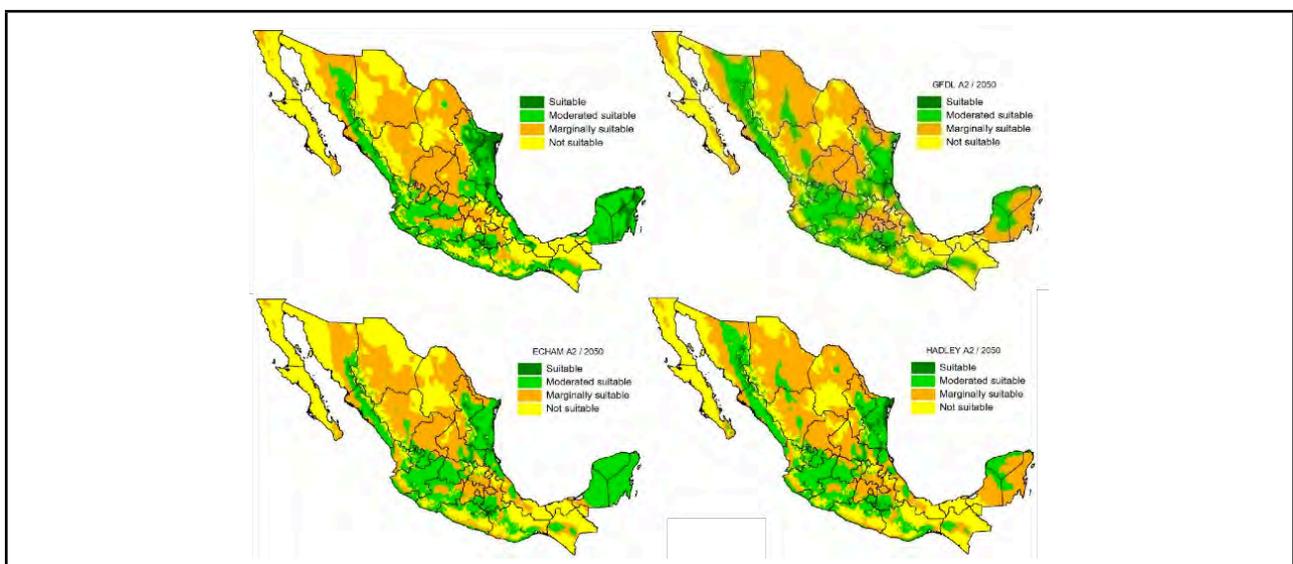


Figura 1.4.6 Escenario base con la climatología 1950-2000, escenarios al 2050 A2, GFDL, ECHAM, HADLEY. (Monterroso Rivas et al. 2009)

## 1.5 Lógica difusa

La lógica difusa inicio en 1965 en la Universidad de California en Berkeley siendo propuesta por Lotfi A. Zadeh (Zadeh 1965), la cual es una generalización de la lógica clásica, que es determinista “verdadero” o “falso”. La lógica difusa a diferencia de la clásica tiene fronteras imprecisas. Donde la membresía a conjunto difuso no esta definido por una afirmación o negación pero si por un grado de pertenencia.

Esto permite que se introduzca un nivel de incertidumbre, lo cual no es posible usando la teoría de probabilidad basada en la lógica Aristotélica que sólo permite dos valores, verdadero o falso. En la lógica difusa se permite que se tenga un grado parcial de verdad, por lo general este grado parcial está entre 0 y 1, entre más próximo este a 1 más certeza se tiene que pertenece al conjunto. El conjunto es una colección de objetos considerada como un conjunto en sí. Los objetos pueden ser cualquier cosa: personas, números, colores, letras, etc.

Si tomamos la definición del conjunto en la lógica clásica, solo va a contener enteramente o excluir enteramente un elemento dado. Tomando como ejemplo un conjunto de temperatura en el universo de las variables físicas tendríamos el conjunto que se muestra en la figura 1.5.1.

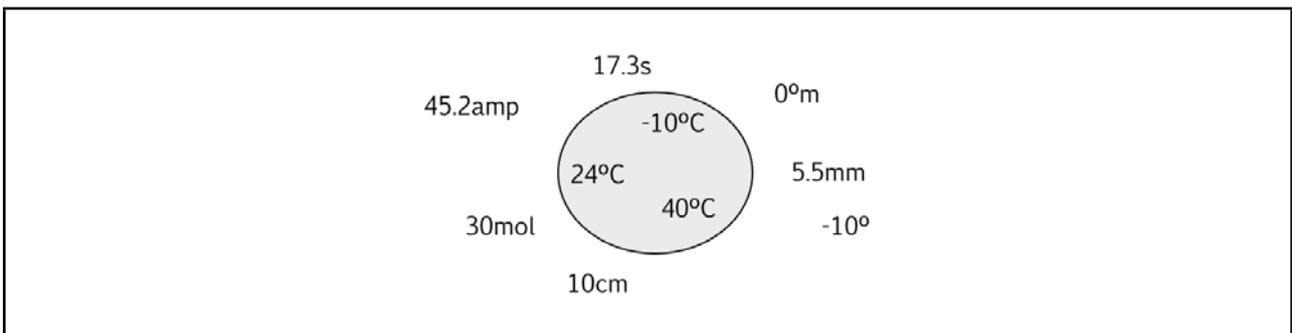


Figura 1.5.1 Conjunto de temperaturas.

Si ahora consideramos un conjunto pero para las temperaturas aptas como se definieron en la tabla 1.4.4, en el universo de las temperaturas tendríamos el conjunto que se muestra en la figura 1.5.2.

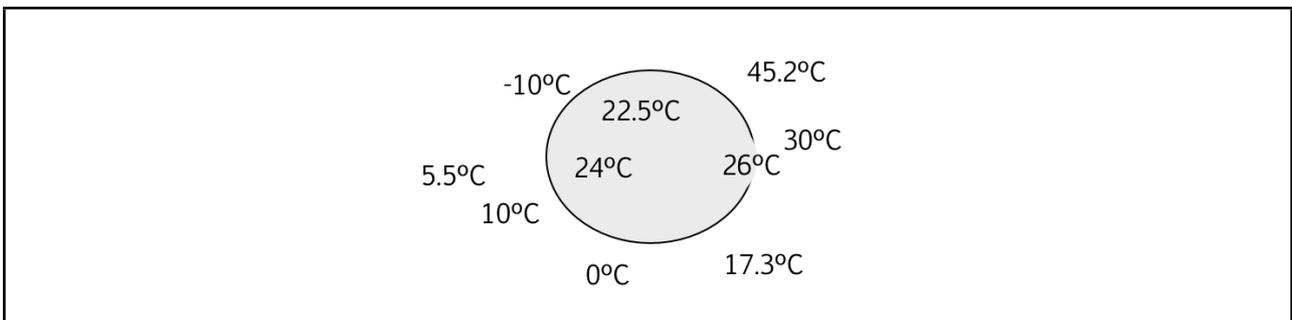


Figura 1.5.2 Conjunto difuso del intervalo de temperaturas aptas.

Los valores del intervalo están definidos entre 22 a  $26^{\circ}\text{C}$ . La razón por la cual el valor de  $26^{\circ}\text{C}$  está en la frontera se debe a que pertenece tanto al intervalo apto como al moderadamente apto, según la tabla 1.4.4. El valor de  $26^{\circ}\text{C}$  forma parte de ambos

conjuntos, por ello si pertenece y al mismo tiempo está excluido. Por ende está a la mitad. Los conjuntos clásicos no aceptarían esta clasificación pero con la lógica difusa se permite al tener un grado de certeza entre 0 y 1. Con este ejemplo se muestra la enunciación base para la lógica difusa:

En lógica difusa, la verdad de cualquier declaración tiene un grado de certeza.

Si a la verdad le damos un grado de certeza de 1 y falso 0, entonces en lógica difusa permitimos los valor entre estos como el 0.5 o 0.7432. Por lo que nos permitimos integrar el valor de 26°C en nuestro conjunto difuso para el intervalo de temperaturas aptas al otorgarle un grado de certeza que pertenece al conjunto.

De acuerdo con el comportamiento que tiene la tasa de fotosíntesis contra la temperatura la cual es una curva tipo gaussiana, y basándonos este comportamiento le diéramos grados de certeza a las temperaturas del conjunto de temperaturas aptas. Podemos construir un conjunto gaussiano para las temperaturas aptas. Usando la lógica clásica esto no sería permisible, estos conjuntos los podemos construir como se muestra en la tabla 1.5.1.

Tabla 1.5.1 Comparación de entre la lógica clásica y la difusa acerca del intervalo de temperaturas aptas.		
Temperatura (°C)	Lógica Clásica	Lógica Difusa
21	0.0	0.0
21.5	0.0	0.3
22	1.0	0.8
23	1.0	0.9
24	1.0	1.0
25	1.0	0.9
26	1.0	0.8
26.5	0.0	0.3
27	0.0	0.0

En este caso los valores del conjunto de la temperatura apta están ajustados al comportamiento que tienen las plantas con respecto a la tasa de fotosíntesis y temperatura, estos valores propuestos en este el ejemplo se convierten a una función de membresía gráfica, como se puede ver en la figura 1.5.3.

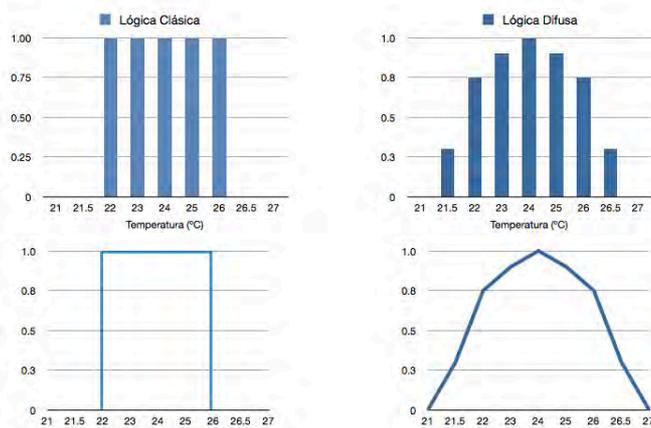


Figura 1.5.3 Comparación gráfica entre la lógica clásica y la difusa comparando la evaluación del intervalo de temperaturas aptas.

En la gráfica de abajo a la derecha podemos notar que el intervalo de aptitud es más abierto al tener un cambio gradual con la temperatura hasta llegar al valor óptimo que 24°C. En cambio en la gráfica de abajo a la izquierda el intervalo es cerrado ya que tanto el valor de 22 y 26°C puede ser 1 o 0.

Las funciones de membresía para cada conjunto determinado por el comportamiento de las variables se le conoce como la función característica y su forma depende del criterio aplicado en la resolución de cada problema, ésta debe variar entre 0 y 1 de forma continua. En este caso fue la función gaussiana. Las funciones que se utilizan de manera más común por su simplicidad matemática y su manejabilidad son; la triangular, trapezoidal, gaussiana, sigmoideal, gamma, pi, campana, curvas polinomiales cuadráticas y cúbicas, etc. (Pérez Pueyo 2005).

Este es el primer paso en la programación difusa: la entrada de datos y la fuzzificación de los datos. Al crear la función de membresía para las temperaturas del intervalo apto, se le asignarán los valores correspondientes a las entradas del programa. Después que se tengan los datos fuzzificados, los conjuntos difusos estarán relacionados entre si por medio de reglas heurísticas, las cuales serán valuadas y se obtendrá una salida que a su vez se desfuzzificará para obtener una valoración. Pasos que se muestran en la figura 1.5.4 se verán con mayor detalle a continuación.

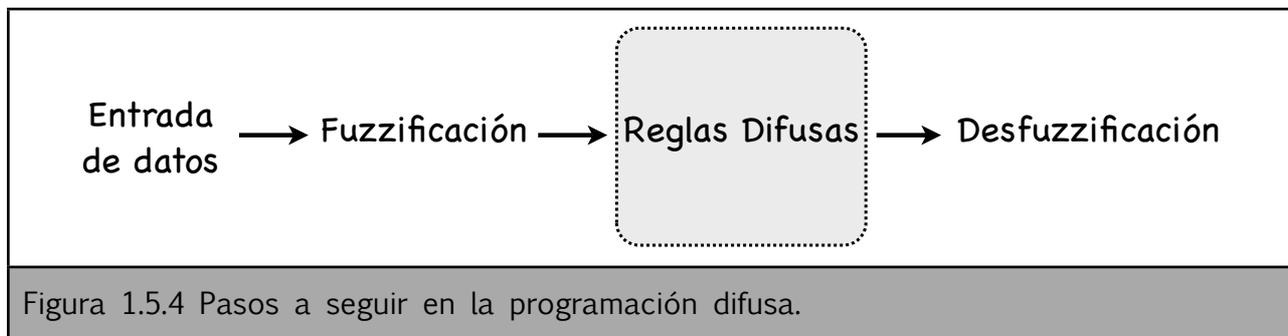


Figura 1.5.4 Pasos a seguir en la programación difusa.

Hay dos tipos de sistemas difusos con base en la opinión de expertos: Control difuso y razonamiento difuso. Aunque en ambos se usen los conjuntos difusos, son muy diferentes en sus metodologías cualitativas.

### 1.5.1 Funciones de membresía

Para la construcción de la función de membresía asociada al conjunto, existen tres métodos: basados en el conocimiento de expertos, utilizando una colección de datos para diseñar la función (como se hizo para las temperaturas aptas), o usando las funciones más comunes.

Para definir una variable se pueden utilizar más de una función característica, esto puede elegirlo el experto. A la vez se puede hacer mucho más preciso, pero aumenta la complejidad en la programación. Además de que estas funciones de membresía pueden estar traslapadas o no, el hecho que estén traslapadas impone que una variable puede pertenecer con diferentes grados a varios conjuntos difusos a la vez, por ejemplo, “el vaso puede estar medio lleno y medio vacío a la vez”.

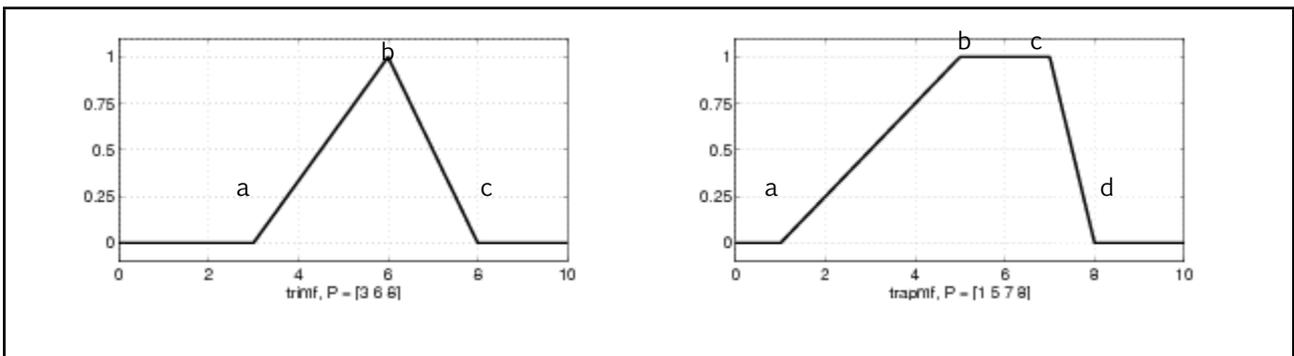


Figura 1.5.1.1 Función de membresía triangular (izq.) y trapezoidal (der.) (MATLAB 2009)

Las funciones de membresía triangular a la izquierda y trapezoidal a la derecha como se muestran en la figura 1.5.1.1 son las más fáciles de calcular y se basan en el uso de segmentos de recta para definir su forma. La función triangular se define mediante tres puntos a, b, y c que se muestran en la figura anterior;

$$trimf = \max \left( \min \left( \frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b} \right), 0 \right)$$

El primer punto es el inicio de la pendiente ascendente (a), el segundo es el pico del triángulo (b), y el tercer punto es punto donde termina la pendiente descendente (c). La función trapezoidal tiene un punto medio adicional para trazar una meseta en la parte superior, los cuales se pueden observar en la figura anterior del lado derecho.

$$trapmf = \max \left( \min \left( \frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c} \right), 0 \right)$$

Las funciones de membresía basados en la distribución gaussiana, si son simétricas tendrá como parámetros de construcción la desviación estándar y el valor promedio los cuales se determinan por los valores en el conjunto. Como la que se muestra a la izquierda en la figura 1.5.1.2 se calculan con la siguiente formula:

$$gaussmf = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}}$$

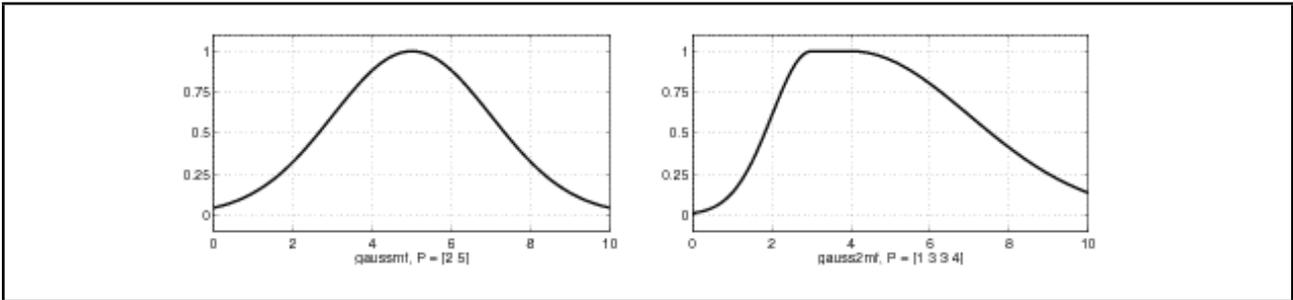


Figura 1.5.1.2 Función de membresía gaussiana. (MATLAB 2009)

Si la función de membresía no es simétrica (derecha en la figura 1.5.2.1) estará definida por dos funciones gaussianas, una por la izquierda y otra por la derecha las cuales, se unen en el punto central sin rebasar el valor de 1.

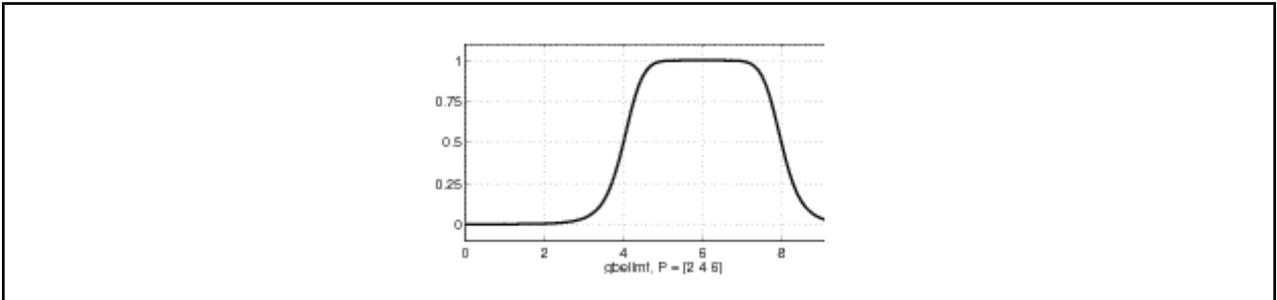


Figura 1.5.1.3 Función de membresía gaussiana. (MATLAB 2009)

La distribución de campana se define con los parámetros de desviación estándar, ancho de la meseta y el promedio, como se ve en la figura 1.5.1.3. Se calcula utilizando la ecuación siguiente:

$$gbellmf = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c}{a} \right|^{2b}}$$

Donde el parámetro b generalmente es positivo, c es el centro de la curva, mientras que el ancho la curva esta definido por a.

Las funciones de membresía sigmoidales que se muestran en la figura 1.5.1.4, son asimétricas, las últimas dos son variantes de la primera. La función sigmoideal es dependiente del parámetro a, que determina el sentido de la apertura dependiendo del signo (+o-) y la pendiente de la curva, y c es el punto de inflexión de la curva.

$$sigmf = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}}$$

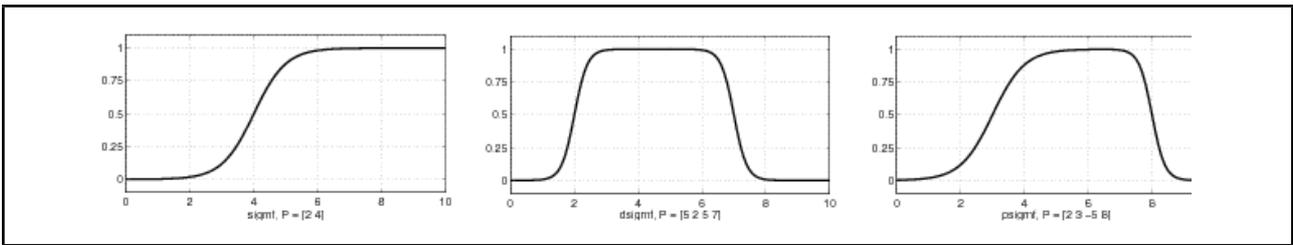


Figura 1.5.1.4 Función de membresía sigmoidales. (MATLAB 2009)

La segunda gráfica en la figura 1.5.1.4 es la diferencia entre dos sigmoidales y la tercera gráfica es el producto entre ellas.

Las funciones de membresía:

- Un conjunto difuso describe un concepto vago (eje. Temperaturas aptas, un día cálido)
- Un conjunto difuso admite la posibilidad de que una variable pertenezca de manera parcial a uno o más conjuntos. (eje. 26°C que pertenece tanto al intervalo apto y moderadamente apto ver tabla 1.4.4)
- El grado de pertenencia de un objeto en un conjunto difuso esta contenido entre 1 y 0. (eje. 26°C tiene un valor de 0.8 ver figura 1.5.3)
- Una función de membresía que está asociada a un conjunto difuso mapea las entradas a los valores apropiados de membresía.

$\vec{A}$  es el conjunto difuso, en un rango de valores [0-1],  $\mu$ , es la función de membresía que representa al conjunto.

$$\vec{A} = (x, \mu_{\vec{A}}(x)) \mid x \in \vec{A}$$

Donde  $\mu_{\vec{A}}(x)$  es el grado de membresía de  $x$  en  $\vec{A}$ ; es decir en que medida pertenece  $x$  en el conjunto, o el grado de certeza que  $x$  es miembro de  $\vec{A}$ . El grado de membresía de  $x$ , estará definido por la función de membresía  $\mu_{\vec{A}}(x)$ .

## 1.5.2 Fuzzificación de los datos

El término es la conversión de los valores determinísticos a difusos, donde cada valor de una variable adquiere un grado de pertenencia a los conjuntos difusos definidos. Esto está definido por las funciones de membresía de los conjuntos difusos, las cuales son continuas y están definidas sobre todo el dominio de la variable. Este proceso se puede definir por el siguiente vector:

$$L = [x, T, X, M]$$

“x”, es el nombre de la variable lingüística que es equivalente al nombre de la variable de entrada. “T” son las etiquetas en las que se representan los valores que adquiere la variable de forma cualitativa. “X” es el universo del discurso el cual contiene el dominio de la variable “x” el cual puede ser continuo o discreto, “M” son las funciones de membresía que asocia a las etiquetas “T” con los valores “X” del universo de discurso.

### 1.5.3 Operaciones con conjuntos difusos

El razonamiento lógico difuso es la extensión de la lógica Booleana, es decir si dejamos los valores extremos de la lógica difusa 1 (completamente verdad) y 0 (completamente falso) entonces los operadores lógicos estándar funcionarán. Ahora sí tenemos las operaciones de Y (AND, \*), O (OR, +), y NO (NOT, -), que representan las intersecciones, la unión, el complemento y la negación de los conjuntos, éstas se pueden representar con las tablas estándar de verdad, que se muestran en la figura 1.5.3.1.

Y			O			NO	
A	B	A y B	A	B	A o B	A	no A
0	0	0	0	0	0	0	1
0	1	0	0	1	1	1	0
1	0	0	1	0	1		
1	1	1	1	1	1		

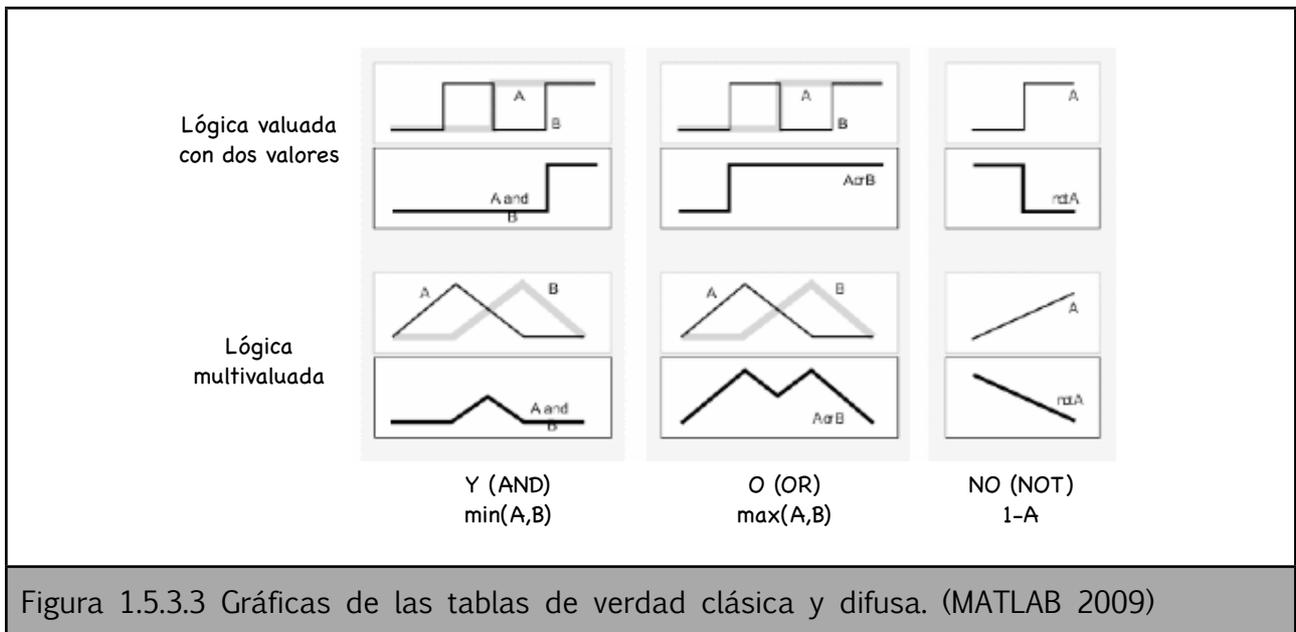
Figura 1.5.3.1 Tablas estándar de verdad. (MATLAB 2009)

Para que estas tablas se mantengan cuando se pasa a la lógica difusa la operación Y se convierte en  $\min(A,B)$ , donde A y B están limitados al rango (0,1). Para el operador O usando el mismo razonamiento será el  $\max(A,B)$  y el operador NO es equivalente a  $1-A$ . Las tablas de la verdad se mantienen igual. Esto se muestra en la tabla de la figura siguiente:

A	B	$\min(A,B)$	A	B	$\max(A,B)$	A	$1-A$
0	0	0	0	0	0	0	1
0	1	0	0	1	1	1	0
1	0	0	1	0	1		
1	1	1	1	1	1		

Figura 1.5.3.2 Tablas difusas de verdad. (MATLAB 2009)

Para facilitar la comprensión de las tablas se utilizan las gráficas de lógica clásica en la que resultan sólo dos valores. En cambio las de la lógica difusa presentan una variación continua a lo largo de un intervalo. Así, cuando se les aplican los operadores lógicos de intersección, unión o negación, los resultados son muy diferentes entre si. Como se puede notar en la figura 1.5.3.3.



Hay dos leyes fundamentales de la teoría clásica de conjuntos como es la del principio de contradicción:  $A \cup \bar{A} = U$ , y el principio de exclusión  $A \cap \bar{A} = \Phi$ , que no se cumplen en la lógica difusa. Por esto la probabilidad que está derivada de estas teorías clásicas cambia cuando está planteada en términos difusos y se habla de certeza.

Las funciones que definen la unión y la intersección de conjuntos difusos pueden generalizarse, a condición que cumplan ciertas restricciones. Cumplen las condiciones de las funciones Conorma Triangular (T-Conorma) que es la unión y Norma Triangular (T-Norma) conocida también como la intersección. Los operadores principales que cumplen con las condiciones para ser t-conormas son el operador máximo y la suma algebraica (O) y los operadores que cumplen para ser t-norma son el operador mínimo y el producto algebraico (Y).

### 1.5.4 Implicación Difusa

Los conjuntos y operadores difusos son sujetos y verbos de la lógica difusa. Al formular las reglas se usan enunciados condicionales ‘Si-Entonces’ que compete a la lógica difusa. La parte Si es el antecedente de la regla y Entonces el consecuente o la conclusión. Tomando el ejemplo anterior de los valores de las temperaturas que forman parte del intervalo de temperaturas aptas, se tiene el siguiente enunciado condicional:

Si son 26°C ENTONCES es más apto

El concepto de “26°C” esta representando un valor de certeza de ser parte del intervalo de temperatura apta entre 0 y 1. A la vez “más” está representando un conjunto difuso, por consecuente se le asigna un conjunto entero a la salida.

Cada regla define una superficie de implicación. Para cada posible valor del antecedente, se obtiene el conjunto difuso realizando la implicación y la superposición de todos estos conjuntos difusos para formar la superficie de implicación de esa regla. Todas las reglas que tienen el mismo consecuente, (eligiendo un operador para realizar la implicación), definirán la misma superficie de implicación pues la superficie se construye para todos los valores que pueda tomar el antecedente (Pérez Pueyo 2005). De la superficie de implicación se obtiene un valor concreto para cada regla, con la intersección de la superficie de implicación con el plano vertical que pasa por el valor del antecedente.

Una vez introducidos los datos, y fuzzificados, los valores concretos son transformados a conjuntos difusos. Se le aplican los operadores y las reglas difusas, para obtener las salidas. Las salidas son conjuntos difusos que se obtienen para cada regla, las cuales son agregadas en un solo conjunto difuso. Finalmente este conjunto se desfuzzifica.

Hay dos formas diferentes para determinar las salidas una que se conoce como Mamdani (Mamdani et al. 1975) que es la más común, donde se obtiene conjuntos difusos en las salidas, y Sugeno (Sugeno 1977) en donde las funciones de salida son más bien lineales o constantes. El método Sugeno se utiliza cuando las salidas son de sistemas lineales (y con métodos de interpolación para no lineales). Este método depende más de las entradas del sistema, por ello se utiliza cada vez con mayor frecuencia en los sistemas de control, por alcanzan una estabilidad de manera más efectiva que los controladores Mamdani. Esto se debe a que las salidas son constantes. En cambio las salidas con el método de Mamdani son lingüísticas (aproximaciones).

Tabla 1.5.4.1 Comparación de los métodos de inferencia difusa. (MATLAB 2009)	
Ventajas del método Mamdani	Ventajas del método Sugeno
<ul style="list-style-type: none"> <li>* Es intuitivo</li> <li>* Esta ampliamente aceptado</li> <li>* Esta muy adaptado a la inferencia humana</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Es computacionalmente más efectivo</li> <li>* Trabaja bien con técnicas lineales</li> <li>* Trabaja bien con técnicas de optimización y adaptativas</li> <li>* Garantiza una continuidad en la superficie de salida</li> <li>* Esta muy adaptado a los análisis matemáticos.</li> </ul>

### 1.5.5 Desfuzzificación

La entrada al bloque desfuzzificador es un conjunto difuso de salida que permite obtener un valor concreto de la variable de salida. Para obtener este valor se aplican métodos matemáticos al conjunto difuso de salida que es la agregación de de todas las reglas. Hay varios métodos para hacerlo, pero los más sencillos son:

- Método del máximo: se elige como el valor de salida aquel valor para el cual la función característica del conjunto difuso es máximo. No es un método óptimo pues el valor puede ser alcanzado por varias salidas.
- Método del centroide: Utiliza como salida el centro de gravedad de la función característica de salida. Con este método se obtiene una salida única.
- Método de la altura: Primero se calculan los centros de gravedad para cada regla del conjunto difuso de salida y después se calcula la media ponderada.

### 1.5.6 Antecedentes de la Lógica Difusa Utilizada en el Área de la Agricultura

La lógica difusa se ha implementado en distintas áreas de la agricultura, pero las más relevantes para este estudio son los trabajos realizados para la evaluación de la marginalidad del uso de tierra para la agricultura de manera global (Cassel-Gintz et al. 1997), así como regional en Benin (Röhrig 2008), y de manera específica para distintos

cultivos con base en el conocimiento de los agricultores locales (Sicat et al. 2005) y con métodos de multicriterio (Prakash 2003) en distintos distritos de la India.

En el trabajo de Cassel-Gintz se evalúa la marginalidad del uso de tierra para la agricultura de manera global y el riesgo de la degradación ambiental debido a la agricultura. Esta evaluación se hizo con una resolución de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ . Las variables que se utilizaron fueron productividad primaria neta de la vegetación natural potencial, el coeficiente de aridez, la variabilidad interna del patrón de la temporada de lluvias, la capacidad potencial de irrigación, la fertilidad del suelo, y las pendientes. La variable de fertilidad de suelo es muy vaga (Leemans et al. 1994), ya que la explicación del proceso no es comprensible y solo los valores entre 0.5 e 1 son distinguibles. Por lo que el rango no representa la variedad de fertilidad de suelos de manera adecuada. Pero el potencial de este acercamiento y en general es ventajoso para los tomadores de decisiones, al brindarles un primer acercamiento al estado de marginación de la tierra, con la premura que se debe de investigar con mayor detalle para áreas en una escala mucho menor, debido a que la resolución solo brindaba las generalidades acerca del riesgo de degradación por las actividades agrícolas.

En el trabajo regional que se aplicó en Benin, se tomó como base el trabajo realizado por (Cassel-Gintz et al. 1997), pero con una mayor resolución,  $1\text{km} \times 1\text{km}$ . En este trabajo se incluyeron tanto los factores ambientales como los económicos, tomando la producción agrícola con bajos insumos, es decir eliminando la variable de irrigación, y utilizando otros datos para la fertilidad de suelo. Se utilizaron datos de radar para regionalizar el índice global y poder delimitar las zonas donde había mayor vulnerabilidad a la degradación de las tierras por la agricultura.

Se usó el conocimiento de los agricultores para la clasificación de aptitud de la tierra para distintos cultivos el cual fue desarrollado por (Sicat et al. 2005), éste se obtuvo por medio de prácticas participativas. El agricultor tenía que dar un valor en orden decreciente en importancia las siguientes variables para la aptitud de un cultivo, temporada de cultivo, color de la tierra, textura de la tierra, profundidad de suelo, y pendiente. Después formularon las funciones de membresía tipo gaussianas, para la textura de suelo, profundidad del suelo y pendiente debido a la correlación o equivalencia entre las definiciones de los agricultores y las clasificaciones científicas de la tierra. En cambio la temporada y color de suelo, son binarias debido al tipo de percepción del agricultor. Con ello se logró construir un modelo para evaluar la aptitud para los distintos cultivos en la zona de Nizamabad en la India.

Prakash, en su tesis evalúa una variedad de variables como son, el pH, carbón orgánico, fertilidad, textura, drenaje, profundidad del suelo, temperatura, precipitación, canal de irrigación, agua subterránea, calles, mercados y industrias de procesamiento, así como la misma población. Usando el proceso analítico jerárquico difuso consiguió los mejores resultados para definir la aptitud para distintos cultivos de la zona Doiwala, al poder tratar con rangos de incertidumbre de las variables; proceso que no logró con el con los otros dos procesos que aplicó.

## 2. Metodología

La construcción del modelo difuso para la evaluación de la aptitud del maíz de temporal se basó en la opinión de expertos, así como en la relación de la teoría del factor limitante (FAO 1994) basado en estas dos fuentes se construyó un modelo que incluye cuatro variables elementales que necesita el maíz para su desarrollo (Monterroso Rivas et al. 2009).

El sistema con base en el conocimiento de expertos es un sistema que simula el proceso de razonamiento de un experto de una área específica. Este tipo de sistemas se desarrollan para poner a la disposición de los interesados la experiencia y el conocimiento de los expertos, y darles una herramienta para resolver el problema. Además puede ser desarrollado para otro tipo de fines como consultoría, diagnóstico, enseñanza, para la toma de decisiones, diseño, planeación, o investigación (Klir et al. 1995). El conocimiento heurístico (que en griego quiere decir descubrir) no garantiza obtener buenos resultados como la solución de un algoritmo de un problema. Más bien son reglas de dedo o conocimiento empírico obtenido de la experiencia que pueden ayudar a resolver un problema, lo cual puede presentar deficiencias en los resultados. Aunque, puede jugar un papel principal en la solución de problemas, a pesar de no se conozca la respuesta exacta (que puede significar una solución impráctica por límites de tiempo y dinero), ésta puede brindar una aproximación a la solución que puede reducir el tiempo y el costo.

Los sistemas basados en el conocimiento de experto son útiles cuando se trata de problemas del “mundo real” que las metodologías convencionales no han podido resolver, especialmente cuando se trata con la incertidumbre o datos incompletos. Al igual que cuando se tratan temas cualitativos, este método es mucho más útil que otros algoritmos.

### 2.1 Características de los Sistemas Difusos con Base en el Conocimiento de Expertos.

Estos sistemas son diseñados para que los inexpertos tengan a su disposición las destrezas de los expertos (Siler et al. 2005) al emular sus patrones de pensamiento. Los primeros trabajos fueron realizados en círculos de inteligencia artificial. Los primeros sistemas difusos con base en la opinión de expertos fueron los programas:

Dendral (Feigenbaum et al. 1993), los cuales determinaban la estructura molécula a partir de los datos de un espectrómetro. Desde mediados de los sesentas se han hecho varios sistemas de expertos, desde sistemas para las operaciones de las naves espaciales; hasta unidades de monitoreo de pacientes de cuidados intensivos o la toma de decisiones financieras.

Hay una variedad de programas computacionales para dar forma a sistemas con base en el conocimiento de expertos. Los primeros fueron los sistemas basados en reglas **Si** (antecedente) **Entonces** (Consecuente) para representar el proceso del razonamiento del experto. Otros métodos son los semánticos o redes asociativas (Quillian et al. 1968), Marcos (Minsky 1975), y redes neuronales, populares en la actualidad (Siler et al. 2005). Este modelo está basado en las reglas SI/ENTONCES. En el tipo de modelo propuesto para este trabajo se tienen tres operadores diferentes Y (AND), O (OR), y NO (NOT), el operador lógico ENTONCES (THEN) es la implicación.

Estos sistemas están diseñados para:

- Alto rendimiento. El sistema tiene que ser capaz de responder a la capacidad igual o mejor que la del experto, por lo que la calidad de los consejos dados por el sistema tiene que ser muy alta.
- Tiempo de respuesta adecuado. El sistema tiene que efectuar en un tiempo razonable, comparable o mejor que el tiempo requerido por un experto para tomar una decisión.
- Buena confiabilidad. Se requiere de un buen funcionamiento, para obtener resultados iguales a los de un experto.
- Entendible. El sistema deberá poder explicar los pasos de su razonamiento mientras se ejecuta, y no ser una caja negra.
- Flexibilidad. Si el sistema con el que basa el conocimiento de los expertos contiene una alta complejidad de conocimientos, es importante tener un mecanismo eficiente para la adición, cambio y eliminación de estos. Se pueden tener reglas guardadas de manera modular, incrementando así la eficiencia.

## 2.2 El sistema difuso con base en el conocimiento de los expertos para medir la aptitud del maíz de temporal tomando en cuenta únicamente la temperatura y precipitación

Para este sistema con base en el conocimiento de los expertos se tomaron en cuenta solamente las variables climáticas necesarias para el desarrollo del maíz de temporal. Se tomaron en cuenta los valores presentados por (Flores et al. 1999) tabla 1.4.2, y la tabla 1.4.4 de (Monterroso et al. 2009) la cual presenta mayor detalle de las variables climáticas, permitiendo construir dos categorías más en la aptitud, que en el caso del modelo presentando serán media y baja aptitud. Para la construcción de los índices anteriores sólo se tomaron en cuenta los valores medios del ciclo, tanto para la temperatura y precipitación (modificación de las tablas de Monterroso solo presentando la temperatura y precipitación tabla 2.2.2). También se modificó la tabla de Flores y se obtuvo los intervalos climáticos presentados en la tabla 2.1.1. Para la elaboración de este nuevo índice igualmente sólo se tomaron en cuenta los valores medios del ciclo.

Tabla 2.2.1 Requerimientos climáticos para el maíz de temporal modificada con base a (Flores et al. 1999)			
Variables Climáticas	Mínimo	Optimo	Máximo
Temperatura	<20	20-30	>30
Precipitación	<500	500-1000	>1000

Tabla 2.2.2 Requerimientos climáticos para el maíz criollo y de temporal en México. (Monterroso et al. 2009)

Requerimientos		TIPO DE APTITUD						
		No Apto	Moderada mente	Medianam ente	Apta	Medianam ente	Moderadam ente	No Apto
Temperatura (°C)	Media del ciclo	<14	14-18	18-22	22-26	26-32	32-39	>40
Precipitación (mm)	Total del ciclo	<300	300-500	500-600	600-900	900-1200	1200-1600	>1600

Los intervalos de las variables de precipitación y temperatura se modificaron ya que la lógica difusa permite que un valor de una variable pueda pertenecer a dos funciones de membresía si es necesario en los que puede cumplir con los requerimientos de ambas tablas. Estas se traslaparon ya que en la naturaleza los intervalos no son tan rígidos y poder caracterizar mejor la aptitud del maíz. (Ver la tabla 2.2.3)

Para el intervalo de temperatura apta se modificó el intervalo a 20-28°C, para aproximar los valores de ambas tablas lo mejor posible. Para los otros intervalos menos precisos de la tabla 2.2.1, se tomó un traslape de  $\pm 1^\circ\text{C}$ , se respetó el valor de 14°C como mínimo ya que representa bien el factor limitante del cultivo de maíz.

De manera similar se construyeron los intervalos para la precipitación media del ciclo, creando un traslape de más y menos 50 mm en su mayoría. Para el intervalo de alta aptitud el extremo hacia menor precipitación el intervalo que le sigue sólo consta de 100mm mostrando un decremento rápido hacia el empeoramiento de la aptitud con menores cantidades de lluvia, por ello el traslape es de 25 mm. Para el valor del intervalo de baja precipitación se respetó el valor de 300mm, al presentarse como un caso severo para el cultivo.

Tabla 2.2.3 Requerimientos agroclimáticos para el maíz criollo y de temporal en México en conjuntos difusos.

Requerimientos		TIPO DE APTITUD						
		NA	Baja	Media	Alta	Media	Baja	NA
Temperatura (°C)	Media del ciclo	<14	13-19	17-23	20-28	25-33	31-40	>39
Precipitación (mm)	Total del ciclo	<350	300-550	450-650	575-950	850-1250	1150-1650	>1550

El diagrama del modelo difuso presenta dos variables de entrada Temperatura media y Precipitación media, y una de salida: Aptitud. El tipo de inferencia es Mamdani (Mamdani et al. 1975) (ver figura 2.2.1) es decir que las salidas serán conjuntos difusos.

Los datos de temperatura y precipitación que se utilizaron en este modelo tiene una resolución de 10x10 km (Conde et al. 2008). Los datos se pueden obtener de la página de internet:

[http://www.atmosfera.unam.mx/cclimat/index.php?option=com\\_phocagallery&view=categories&Itemid=85](http://www.atmosfera.unam.mx/cclimat/index.php?option=com_phocagallery&view=categories&Itemid=85)

Se hicieron los cálculos necesarios para obtener las medias anuales a partir de los cambios previstos por los datos originales, usando para el escenario base de 1950 al 2000, ya que los datos están presentados como la diferencia que habrá de acuerdo a los escenarios de cambio climático del UKHAGEM1 (HADLEY), GDFL CM 2.0 (GDFL), y el MPI ECHAM 5 (ECHAM) para los horizontes de 2030 y 2050, para las cuatro familias A1, A2, B1, y B2. Para la variable de temperatura se sumaron los doce meses del año y se dividió entre doce para calcular la temperatura media del ciclo. La precipitación se

presenta como la acumulación de la lluvia a lo largo del año, por esta razón se hace la suma de los datos para cada mes.

Se construyó una malla la cual cubre el territorio de la República Mexicana, cada punto de la malla tiene dos valores correspondientes a las dos variables (temperatura y precipitación).

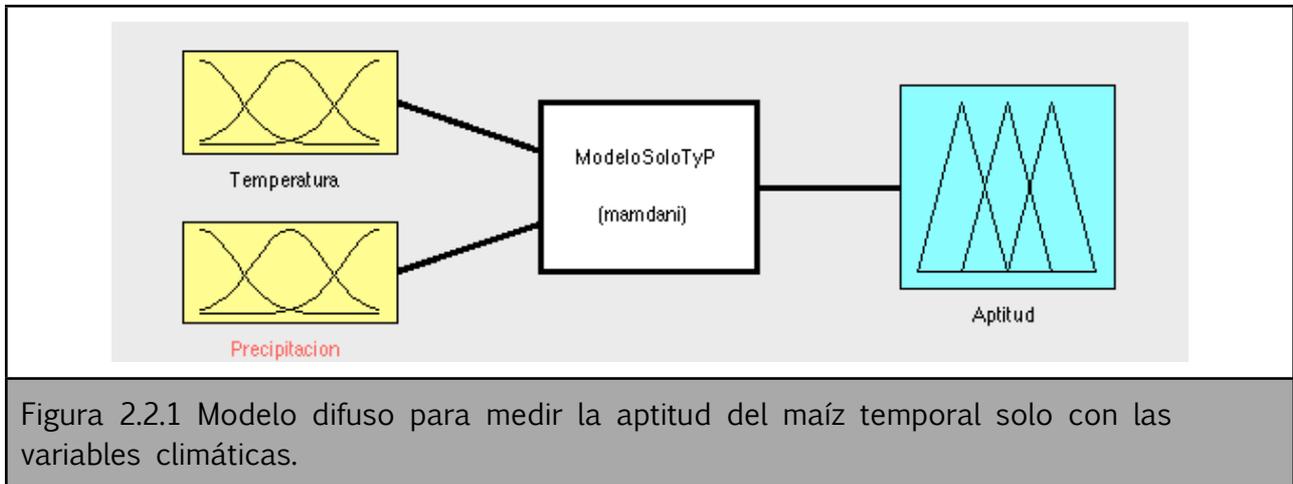


Figura 2.2.1 Modelo difuso para medir la aptitud del maíz temporal solo con las variables climáticas.

Las funciones de membresía seleccionadas fueron las triangulares y las trapezoidales. Al no contar con las sutilezas de la semántica, el incremento y decremento son de manera lineal de [0,1] a [1,0], pero divide el universo en partes lingüísticamente significativas para el proceso de control. Se usaron estas funciones de membresía debido a su origen de conjuntos cerrados (Shepard 2005). Las trapezoidales se usaron en los bordes, para encuadrar los valores de certeza de la intolerancia de los intervalos de no aptitud. Como se puede ver en las figuras 2.2.2 y 2.2.3.

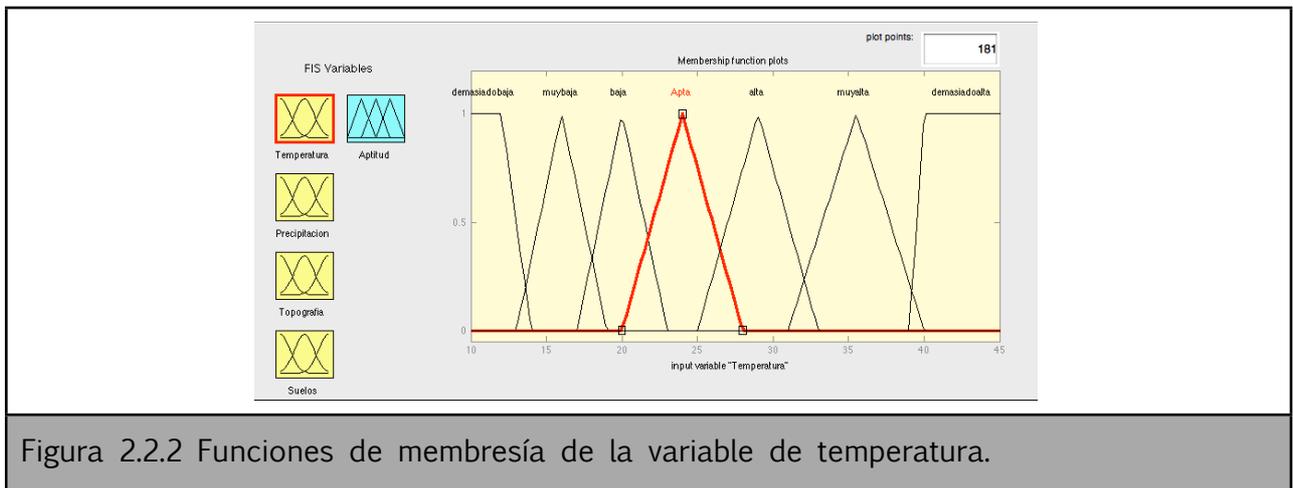


Figura 2.2.2 Funciones de membresía de la variable de temperatura.

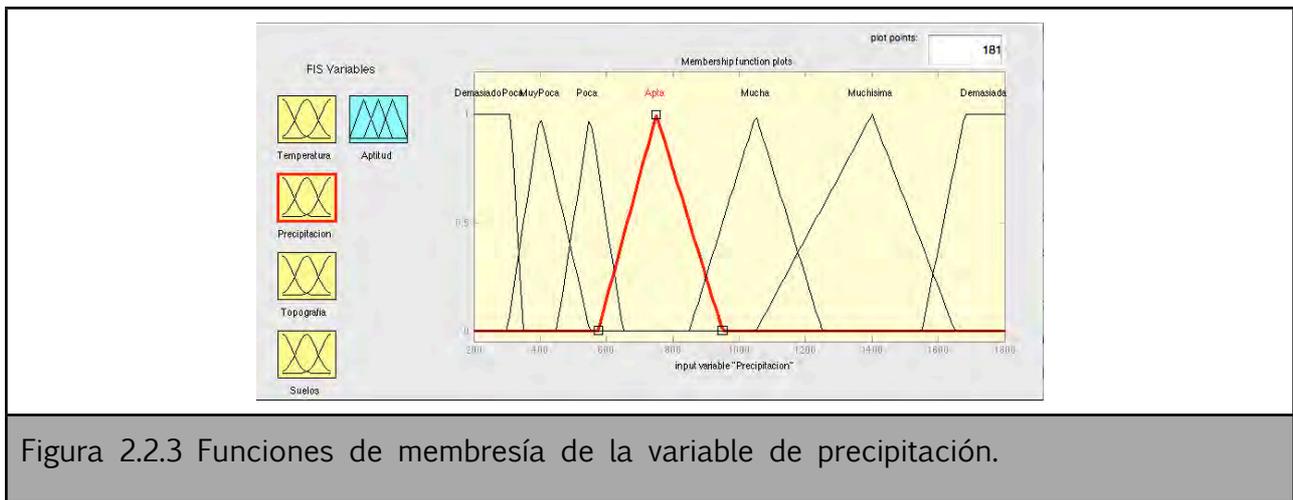


Figura 2.2.3 Funciones de membresía de la variable de precipitación.

En las reglas dictadas por el experto, se resaltaba la necesidad de forzar el sistema hacia las menores aptitudes, ya que si alguna de las dos variables se determinaba de un menor rango que la otra, la aptitud debía corresponder a la de menor rango.

Las reglas que se usaron en este modelo fueron de dos tipos, las de intersección (Y) y de unión (O). Las de intersección:

- Si la temperatura es apta Y la precipitación es apta ENTONCES la aptitud es Apta
- Si la temperatura es baja (o alta) Y la precipitación es poca (o mucha) ENTONCES la aptitud es Media
- Si la temperatura es muybaja (o muyalta) Y la precipitación es muy poca (o muchísima) ENTONCES la aptitud es Baja
- Si la temperatura es demasiadobaja (o demasiadoalta) Y la precipitación es demasiadopoca (o demasiada) ENTONCES la aptitud es No Apta

Aquí se tienen las combinaciones, de las reglas por lo que representan en realidad 12 reglas distintas.

En las reglas del segundo tipo O, están en caso de que se tenga una combinación entre los grados de aptitud, es decir si tengo una temperatura apta y una precipitación no apta. De esta manera se podía garantizar que si alguna variable era de menor dominación que las otras, la aptitud también va a tender a este rango menor.

- Si la temperatura es demasiadobaja (o demasiadoalta) O la precipitación es demasiadopoca (o demasiada) ENTONCES la aptitud es No Apta
- Si la temperatura es muybaja (o muyalta) O la precipitación es muy poca (o muchísima) ENTONCES la aptitud es Baja
- Si la temperatura es baja (o alta) O la precipitación es poca (o mucha) ENTONCES la aptitud es Media

De esta manera se puede garantizar el efecto del factor limitante, una componente del medio que cuando su valor se encuentra por debajo o por arriba de cierto valor impide un determinado crecimiento del cultivo.

La variable de salida es la aptitud en este modelo (ver figura 2.24).

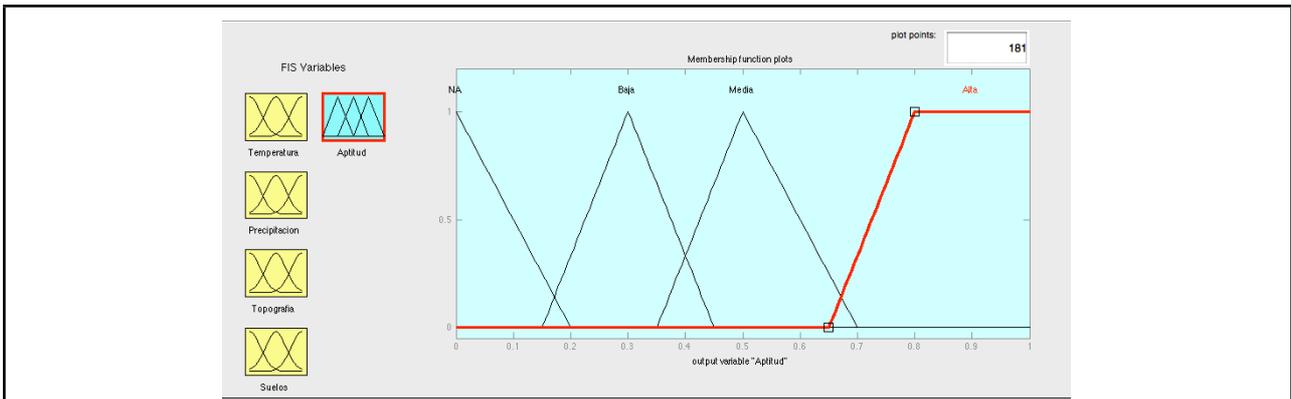


Figura 2.2.4 Funciones de membresía de la variable de salida, Aptitud.

Con las reglas se obtiene una superficie, la cual representa la aptitud (ver figura 2.2.5).

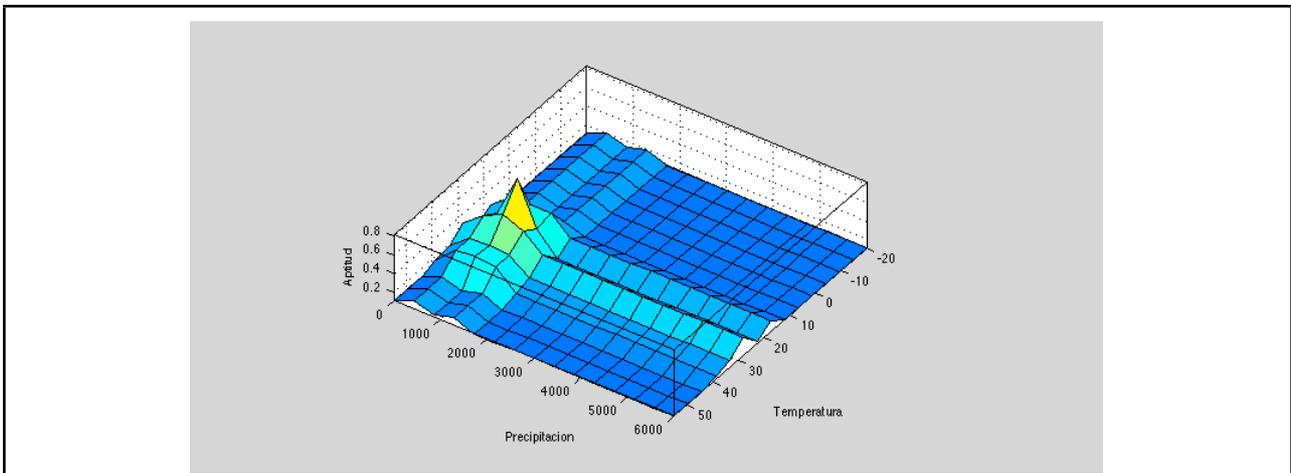


Figura 2.2.5 Superficie de las reglas entre temperatura y precipitación.

En la superficie notamos que donde se hace la unión de los intervalos de las variables, se denota los intervalos de aptitud alta a no aptitud.

### 2.3 El sistema difuso con base en el conocimiento de los expertos para medir la aptitud del maíz temporal

En este sistema con base en el conocimiento de los expertos se cuenta con los requerimientos agroclimáticos para el maíz criollo y de temporal en México. En este modelo se incluyeron las variables de pendiente y profundidad de suelo.

Se hicieron cambios a la tabla original (ver tabla 1.4.4), ya que en la lógica difusa nos permite que un elemento pueda pertenecer a dos conjuntos, así se eliminaron las fronteras rígidas, simulando mejor el comportamiento de la planta. Para los intervalos de las variables de temperatura y precipitación se usaron los mismos que para el modelo anterior (ver tabla 2.2.3), por las razones ya expuestas.

Para los valores de los intervalos de la variable de la pendiente se calcularon los valores medios de los intervalos originales y se les resto y sumo 2 grados para generar los

extremos de los nuevos intervalos; menos en el extremo alto del intervalo de baja se sumaron 3 grados para incrementar el traslape entre las de funciones membresía debido a que la función de membresía de No Apto es una trapezoidal. La información de la variable de profundidad de suelo sólo se consiguió ya clasificada en cuatro intervalos de 0 a 10 (0), de 10 a 50 (1), 50 a 100 (2) y mayores a 100 (3) centímetros de profundidad, como el intervalo de 50 a 100 cm (2), ya está clasificado en la tabla original 1.4.4 con una aptitud buena, el intervalo de alta empieza en 2.

Tabla 2.3.1 Requerimientos agroclimáticos para el maíz criollo y de temporal en México en conjuntos difusos.

Requerimientos		TIPO DE APTITUD						
		NoApto	Baja	Media	Alta	Media	Baja	NoApto
Temperatura (°C)	Media del ciclo	<14	13-19	17-23	20-28	25-33	31-40	>39
Precipitación (mm)	Total del ciclo	<350	300-550	450-650	575-950	850-1250	1150-1650	>1550
Topografía	Pendiente (%)	<28	14-33	6-21	0-10	6-21	14-33	>28
Suelos	Profundidad (cm)	0-0.9	0.4-1.5	1.4-2.5	2-4	1.4-2.5	0.4-1.5	0-0.9

Este modelo consta de cuatro entradas, la temperatura media, la precipitación acumulada en el año, la pendiente y la profundidad del suelo. El modelo está construido para la inferencia tipo Mamdani, y una sola salida que es la aptitud. El esquema del modelo se presenta a continuación, en la figura 2.3.1:

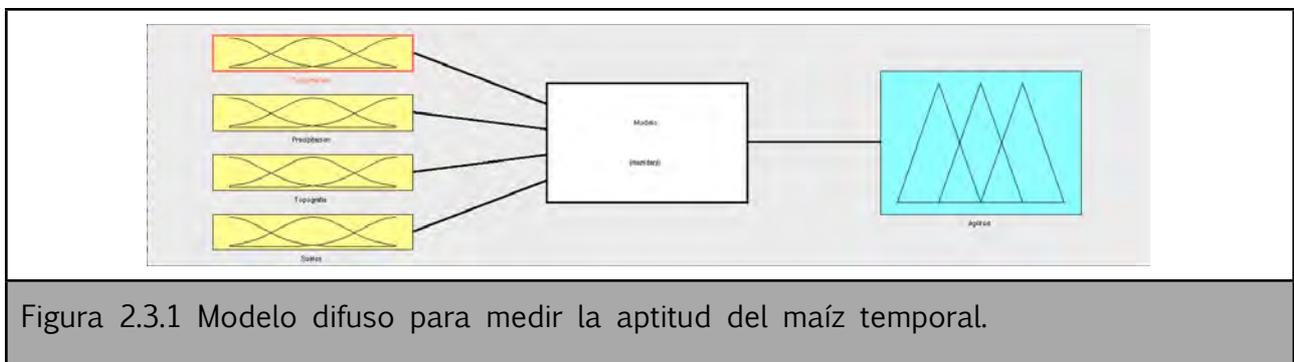


Figura 2.3.1 Modelo difuso para medir la aptitud del maíz temporal.

De acuerdo con los valores calculados de la tabla 2.3.1, se construyeron las funciones de membresía para cada una de las variables de entrada. Las funciones de membresía seleccionadas fueron las triangulares y las trapezoidales por las razones ya expuestas en el modelo anterior, excepto para el caso de la profundidad de suelos, por que los datos que se obtuvieron ya estaban clasificados. Las funciones se muestran a continuación con respecto a los intervalos propuestos en la tabla 2.3.1, la figura 2.3.2 es la de temperatura, figura 2.3.3 es la de la precipitación, la figura 2.3.4 es la de la pendiente y la figura 2.3.5 es la de la profundidad de suelo. En la figura 2.3.6 se muestra la variable de salida que es la aptitud.

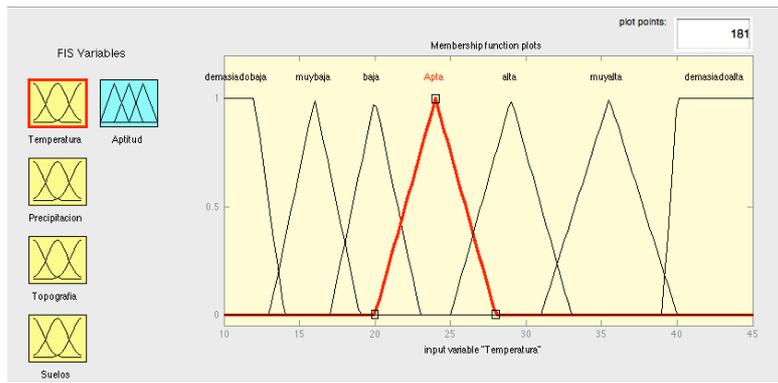


Figura 2.3.2 Funciones de membresía de la variable de temperatura.

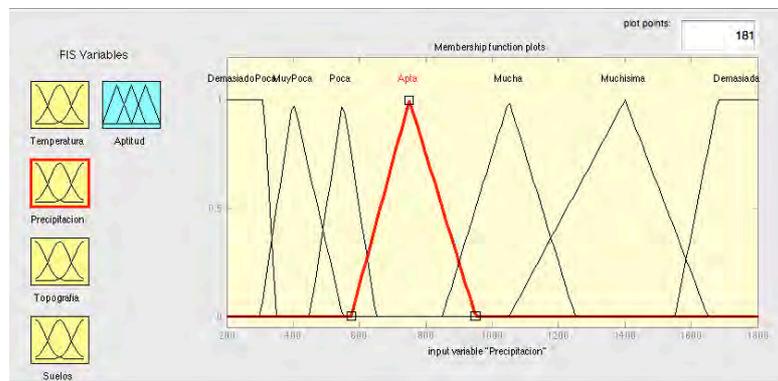


Figura 2.3.3 Funciones de membresía de la variable de precipitación.

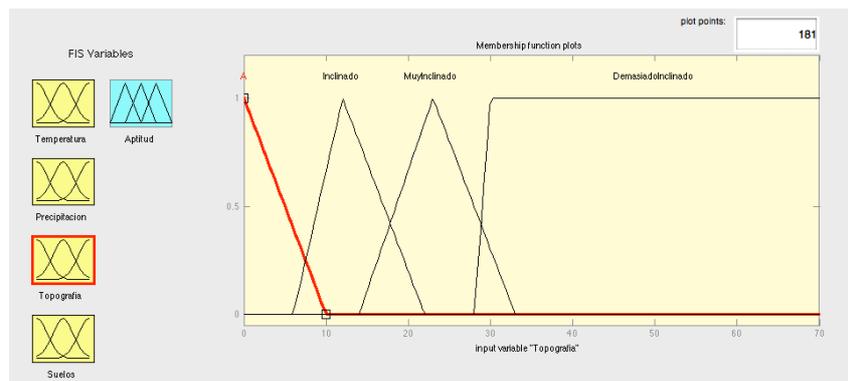


Figura 2.3.4 Funciones de membresía de la variable de pendiente.

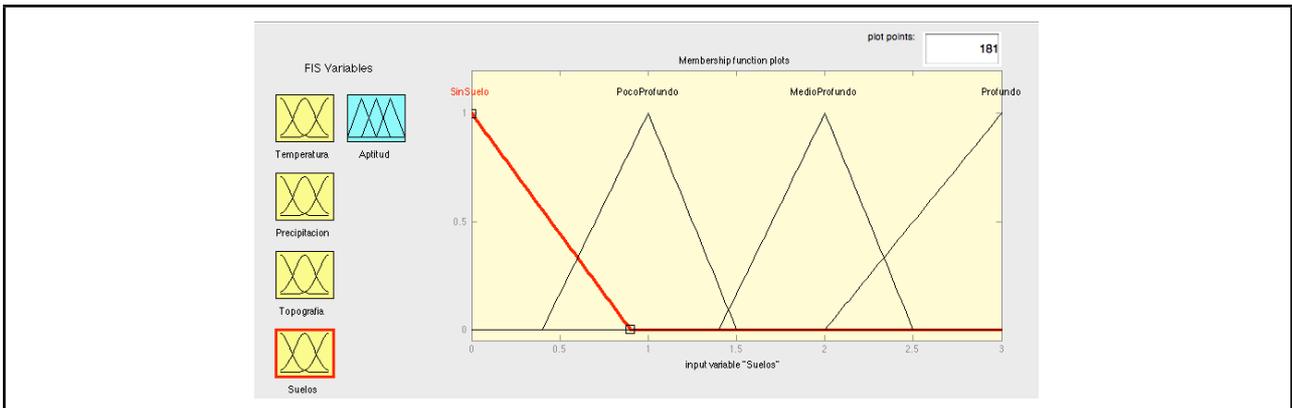


Figura 2.3.5 Funciones de membresía de la variable de profundidad.

Además de las reglas de correspondencia entre las variables dictadas por el experto con base en la teoría del factor limitante, las reglas principales fueron:

- Las cuatro variables deben de ser aptas para que el lugar sea considerado como Apto.
- Si se presenta una de las cuatro variables como No Apta, entonces el lugar será No Apto.
- Si alguna variable es de denominación menor, es decir media o baja aptitud entonces el lugar tendrá una aptitud media o baja en consecuencia.

El lenguaje ya es difuso, y se empezaron a formar las reglas Si Entonces. Si tomamos la primera regla y la extendemos en una regla formal, tendremos:

- Si la temperatura es apta Y la precipitación es apta Y la profundidad del suelo es profundo Y la pendiente es apta ENTONCES la aptitud es Alta.

En cambio para las siguientes en vez de ser la intersección Y, será la unión O:

- Si la temperatura es demasiado baja (o demasiado alta) O si la precipitación es demasiado poca (o demasiada) O la pendiente es demasiado inclinada O la profundidad de suelo es sin suelo ENTONCES la aptitud es No Apto.

Las reglas se formularon para emular el conocimiento del experto. Además de esta manera se puede garantizar el efecto del factor limitante, una componente del medio que cuando su valor se encuentra por debajo o por arriba de cierto valor impide un determinado crecimiento del cultivo.

La construcción de los intervalos de la variable de salida se muestran en la figura 2.3.6.

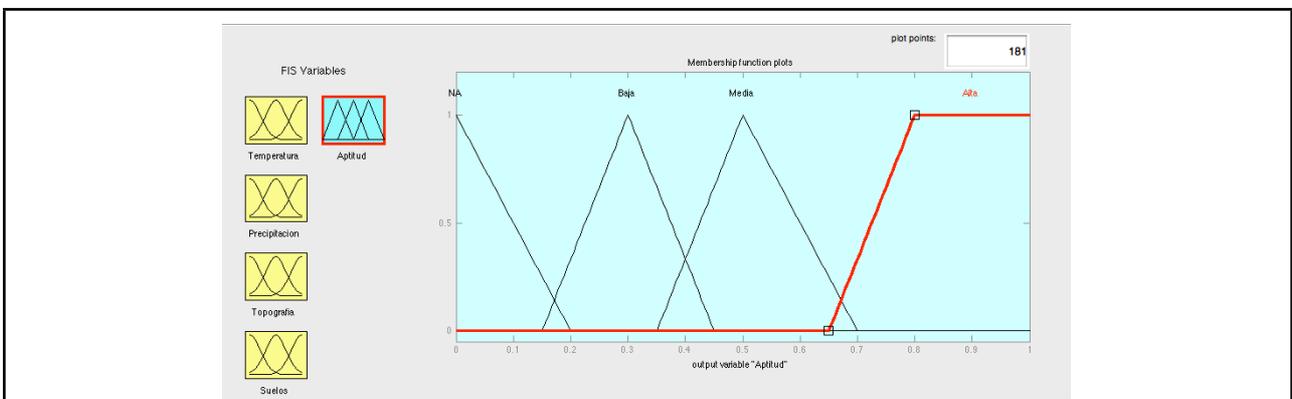


Figura 2.3.6 Funciones de membresía de la variable de salida, Aptitud.

La intersección se emplea es por la teoría del factor limitante sólo considera que una de las variables sea de una menor denominación para que el resultante de aptitud pertenezca a esa denominación.

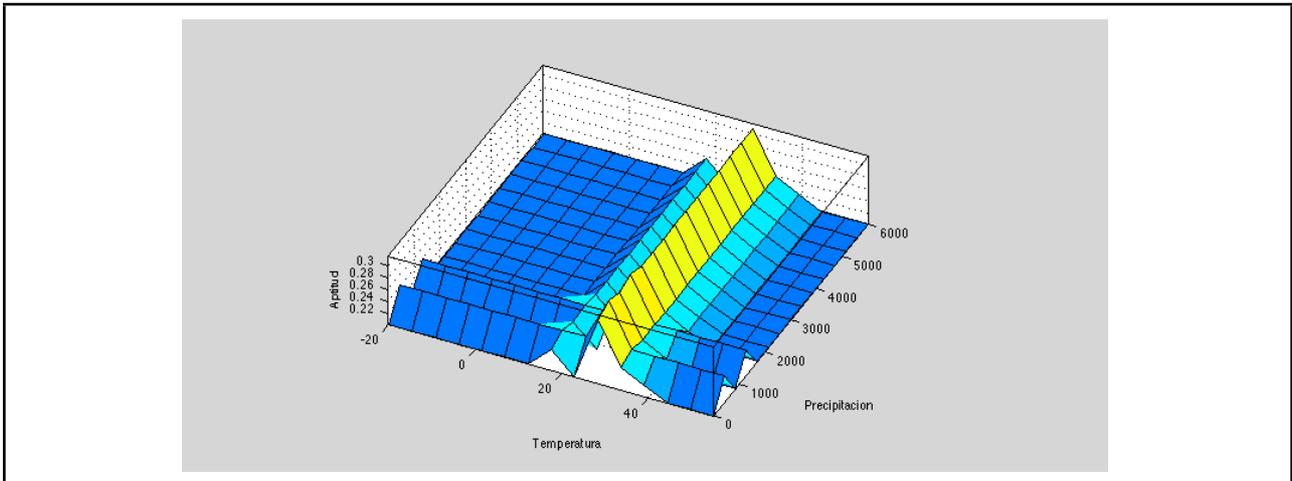


Figura 2.3.7 Superficie de las reglas entre temperatura y precipitación.

La superficie que se muestra en la figura 2.3.7 tiene esta forma particular ya que requiere que las cuatro variables sean aptas para tener un valor alto en la aptitud, como aquí sólo se tienen dos de las cuatro, se ve un valle en la zona donde debería estar representado el valor más alto. Las zonas más altas se deben a la regla tipo de unión O, de la aptitud media.

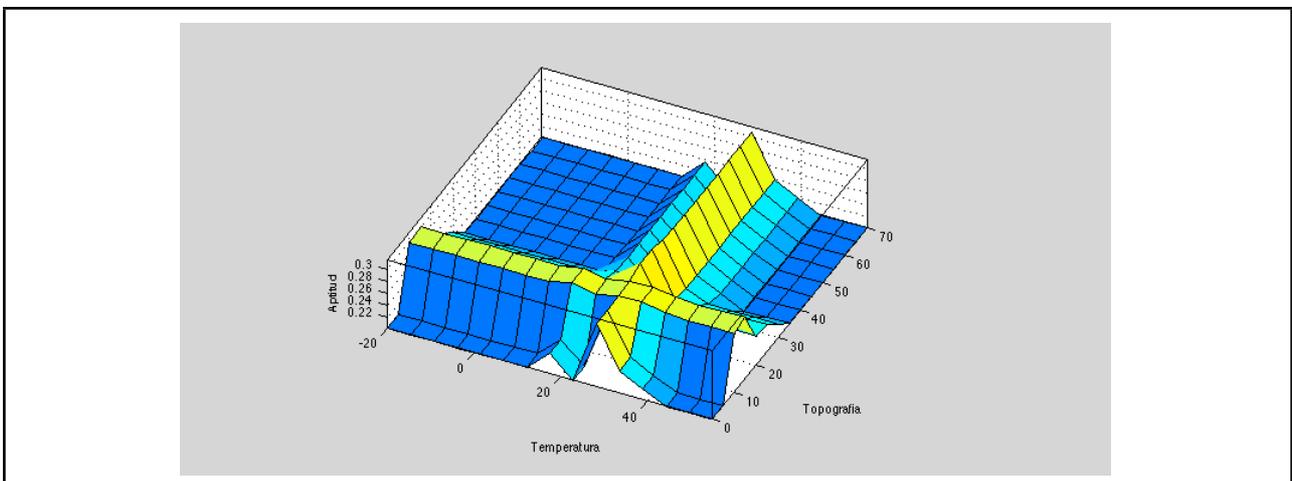


Figura 2.3.8 Superficie de las reglas entre temperatura y la pendiente.

En la superficie de la figura 2.3.8 es más fácil denotar la relación entre las variables, debido a las funciones de membresía que tiene es la pendiente. Aquí la mayor aptitud está concentrada donde los valores de ambas variables son aptas.

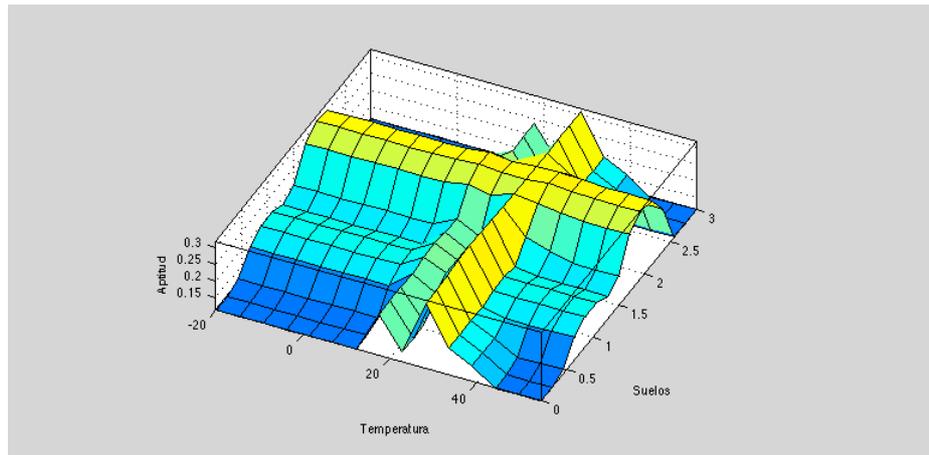


Figura 2.3.9 Superficie de las reglas entre temperatura y la profundidad de suelos.

En la figura 2.3.9 presenta otra forma muy irregular, pero esto se debe a las reglas de tipo unión O, donde se encuentran los valores más altos, pero la superficie denota una aptitud baja, lo que se puede ver en los valores, al no sobrepasar del valor de 0.345. La precipitación al igual que la temperatura presenta comportamientos similares con las otras variables, como se puede observar en las figuras siguientes 2.3.10, 2.3.11 y 2.3.12.

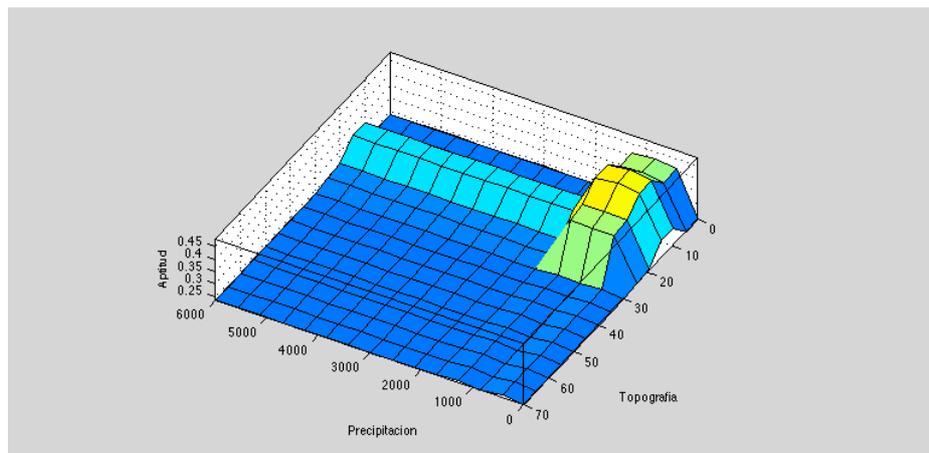


Figura 2.3.10 Superficie de las reglas entre precipitación y la pendiente.

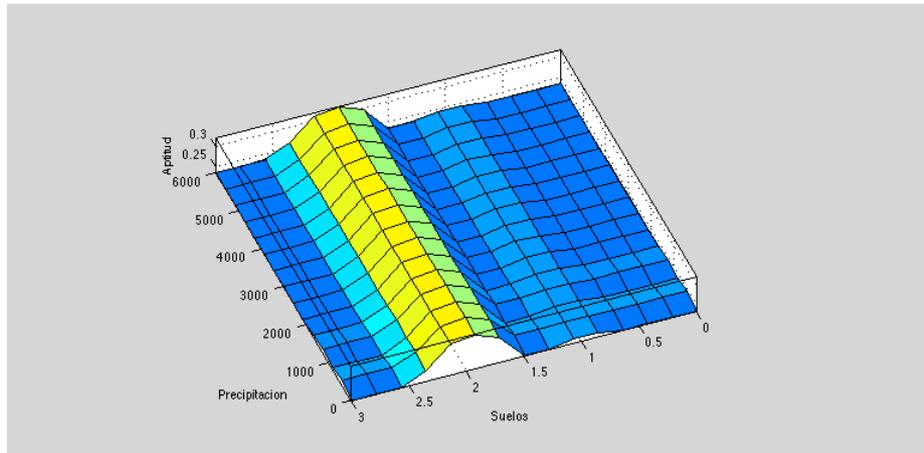


Figura 2.3.11 Superficie de las reglas entre precipitación y la profundidad de suelos.

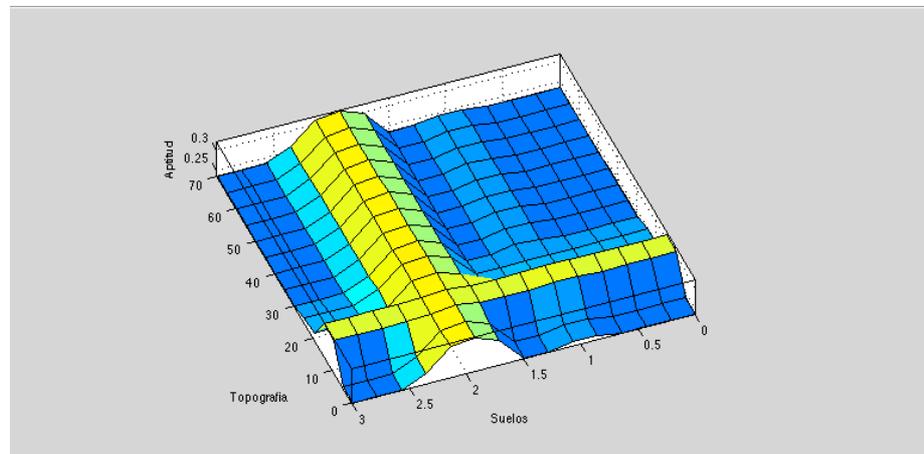


Figura 2.3.12 Superficie de las reglas entre la pendiente y la profundidad de suelos.

Si generalizamos el comportamiento de las superficies de las figuras anteriores podemos resaltar que es necesario que la variable tenga un valor apto para que la aptitud resulte buena ya que ninguna de las superficies sobrepasa del valor de 0.3. Para evaluar los posibles cambios debido al efecto del cambio climático en la aptitud del maíz de temporal. Se construyó un escenario base con los datos de los mapas de temperatura media y precipitación anual promedio de 1950-2000 de 10x10 Km (Conde et al. 2008) pero interpolados a 1x1 Km (Fernandez-Eguiarte et al. 2010). La pendiente fue calculada a partir de los datos del Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) con resolución espacial de 30s, (CGIAR-CSI 2008). Se calcularon las pendientes de cada punto en cuatro direcciones, y se tomó la máxima pendiente para representar la pendiente en ese punto. Después se adecuó interpolando los datos para obtener los datos a una resolución de 1km x 1km haciendo coincidir con la misma malla que se tiene para los otros datos de climatología. La profundidad de suelo se obtuvo del mapa de suelos dominantes en la República Mexicana (INEGI 1998), también en una malla de 1km x 1km, que cubría el territorio de la República Mexicana. Esta malla cumple con los mismos valores de latitud y longitud que la malla de temperatura. Por ello cada punto de la

maña tenía los cuatro valores correspondientes a cada una de las variables utilizadas en el modelo.

Para los escenarios de cambio climático se utilizaron las salidas de los modelos UKHAGEM1 (HADLEY), GDFL CM 2.0 (GDFL), y el MPI ECHAM 5 (ECHAM) para los horizontes de 2030 y 2050, para las cuatro familias A1, A2, B1, y B2, interpolados a 1km x 1km.

### 3. Resultados

Las salidas de los tres modelos de circulación general UKHAGEM1 (HADLEY), GDFL CM 2.0 (GDFL), y el MPI ECHAM 5 (ECHAM) presentan una variedad de posibles cambios en el clima de México. Los tres muestran un incremento en la temperatura media a medida que pasa el tiempo, en cambio para la precipitación los resultados de los tres difieren. El modelo ECHAM es el que mayor aumento de temperatura presenta y disminución en las lluvias cerca del 10%. HADLEY muestra un incremento en la temperatura en cambio la precipitación cambia poco a lo largo del tiempo. El modelo GDFL presenta el menor incremento de la temperatura con un incremento marcado en la precipitación cerca del 10% dependiendo del escenario de emisiones. Los mayores cambios se presentan en el horizonte del 2050. Con base en los modelos podemos observar que los mayores cambios se presentan en el horizonte del 2050, por ello los resultados que se describirán a continuación pertenecen a este. Los resultados del 2030 se encuentran en los anexos.

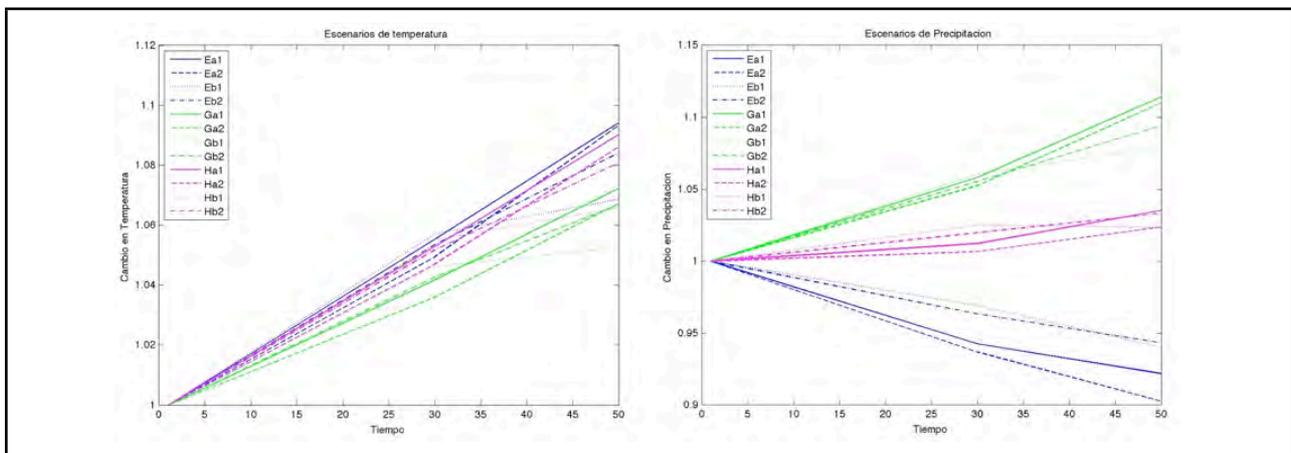


Figura 3.1 Gráficas de los escenarios de temperatura y precipitación hasta el horizonte 2050. Notación MPI ECHAM 05 (E), GDFL CM 2.0 (G) y UKHAGEM1 (H), escenarios de emisiones (a1, a2, b1, b2).

#### 3.1 Resultados del modelo difuso tomando en cuenta únicamente temperatura y precipitación

En el escenario base con las temperaturas y precipitación observados para el intervalo de tiempo de 1950 a 2000 se obtiene que las zonas con mayor aptitud climática se encuentran en el estado de Tamaulipas, la zona Noreste del estado de Nuevo León, a lo largo de la Sierra Madre Occidental en los estados de Sinaloa y Sonora (figura 3.1.1). También en el estado de Morelos en frontera con los estados de Puebla y Guerrero. En los estados de Michoacán, Jalisco, Colima y Aguascalientes se encuentran manchones importantes, como al sureste de Oaxaca en frontera con Chiapas, al igual que en la zona Norte del estado de Yucatán.

Las zonas mayores sin aptitud climática (figura 3.1.1) corresponden a las zonas desérticas, al norte del país, en los estados de Chihuahua, Durango, Zacatecas, San Luis Potosí, Sonora, Baja California y Baja California Sur.

La otra zona sin aptitud corresponde a la zona tropical húmeda al sur del país en los estados de Chiapas, Tabasco, Sur de Veracruz, y Oaxaca, este mapa de la figura 3.1.1

presenta los valores obtenidos evaluando las variables climáticas en el modelo difuso. Los valores presentan cambios sutiles dependiendo del valor de entrada, ya que no es lo mismo si la temperatura es de 24°C o 28°C, por ejemplo.

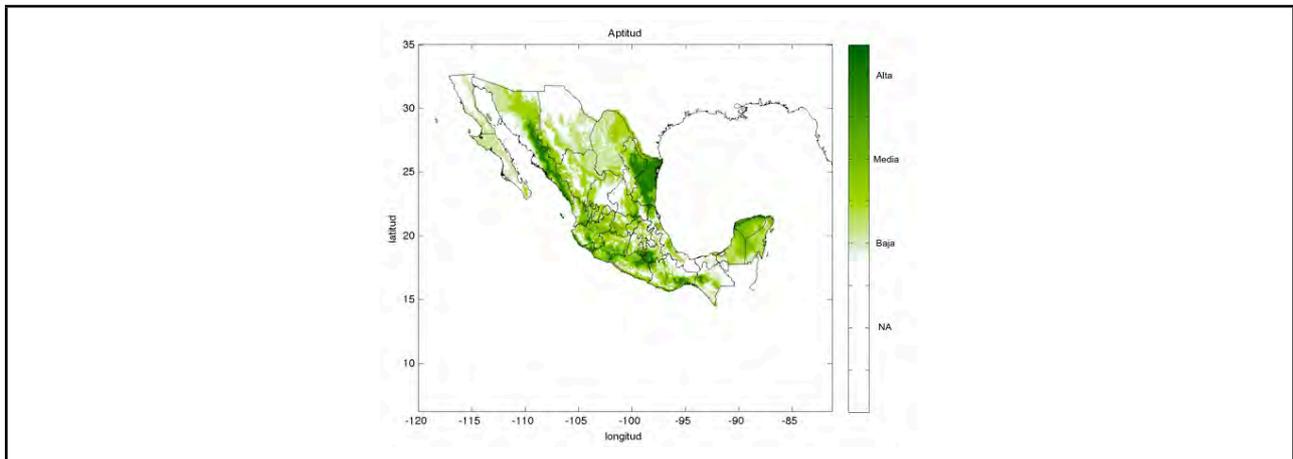


Figura 3.1.1 Mapa base de aptitud con temperatura y precipitación

Para lograr una visualización y la comparación con los estudios anteriores se clasificaron los resultados en las cuatro categorías NA (No Apto), Baja, Media y Alta. Este proceso disminuye la riqueza de los datos ya que no hay una variación de valores como la podemos encontrar en el mapa anterior. Por ejemplo si tres de las cuatro variables son clasificadas medias y la ultima alta, dará un valor más alto de aptitud que si fuesen cuatro variables de aptitud media. Esta clasificación se puede ver en el mapa de la figura 3.1.2. La clasificación se hizo acorde a los valores que se presentan en los intervalos de aptitud de la salida del modelo descrito en el capítulo 2 (figura 2.2.4).

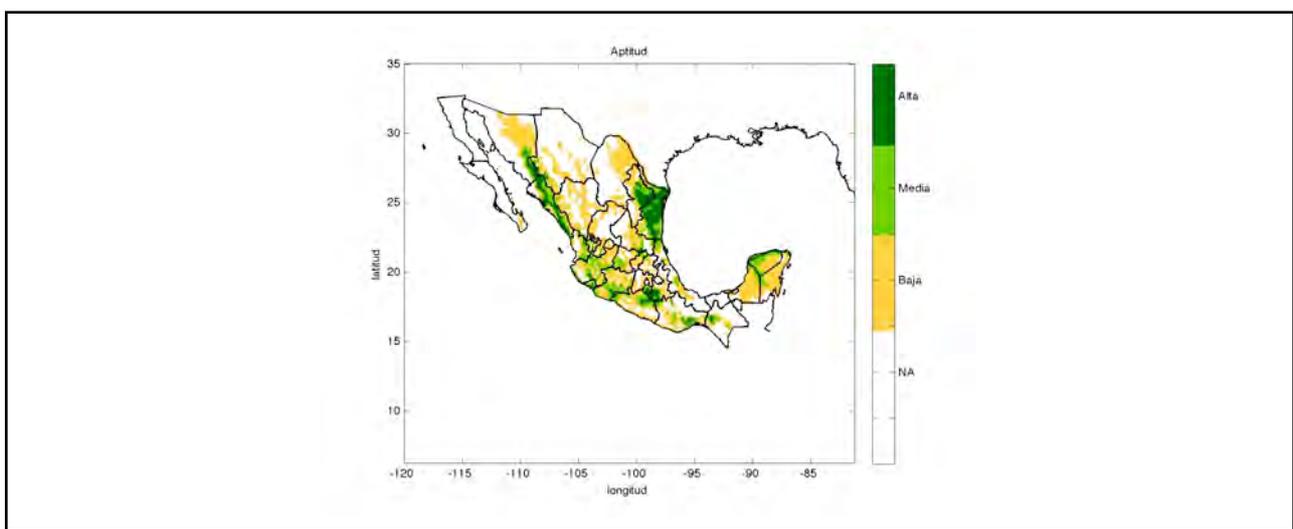


Figura 3.1.2 Mapa base de aptitud con temperatura y precipitación clasificado

Los porcentajes de las áreas que presentan las distintas clasificaciones para el escenario base se pueden ver en la tabla 3.1.1. La aptitud baja es la más predominante en el país, seguida por las áreas de no aptitud debido a la extensión de los desiertos de México y en zonas en las que la precipitación supera los 2500 mm por año.

Tabla 3.1.1 Porcentaje de las áreas con distintas aptitudes del mapa base.			
Alta	Media	Baja	No Apta
7.95%	15.21%	39.51%	37.42%

### 3.1.1 Resultados del modelo ECHAM para el horizonte 2050 utilizando solo las variables climáticas.

Para todas las familias se ve un aumento del casi del 20% de las zonas aptas con respecto al escenario base, al igual de las zonas con aptitud media a costa de las de aptitud baja y no apta, por lo que se denota una disminución tanto en las zonas con aptitud baja y no apta con respecto al mapa base (figura 3.1.1).

Este cambio es más pronunciado en el escenario A2 que presenta la mayor aumento de temperatura y mayor disminución de lluvia y menor cambio en el escenario B1 que tiene el menor cambio en la temperatura y menor disminución de lluvias (figura 3.1.1.1).

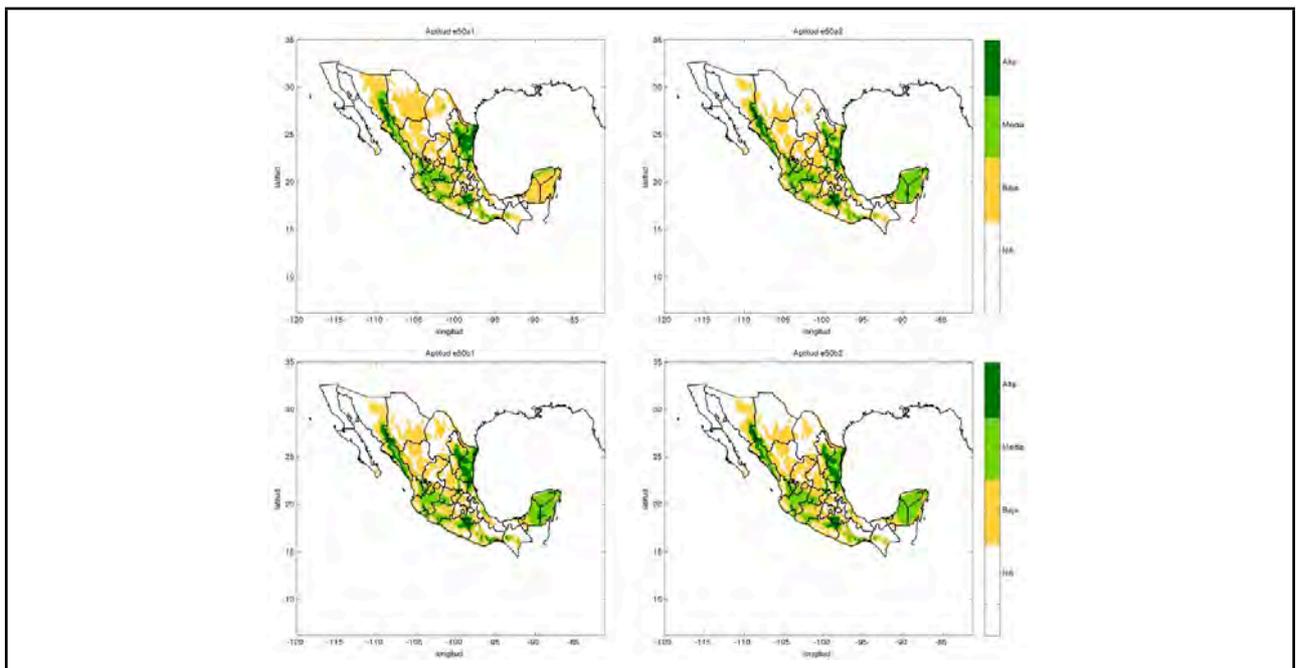


Figura 3.1.1.1 Mapas de aptitud con temperatura y precipitación para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo ECHAM para el horizonte 2050.

En general los cambios hacia una mejor aptitud para el maíz de temporal se da en la zona sur como en la península de Yucatán y centro del país, al mejorarse las condiciones climáticas para el cultivo. Estos cambio positivos, pueden verse disminuidos si se consideraran otras condiciones como las del suelo, y aún más por factores ambientales como la propagación de plagas, por ejemplo. Mientras que la pérdida de aptitud más importante se da en el estado de Tamaulipas donde zonas con una alta aptitud alcanzan hasta una baja aptitud. Que podría ser contrarrestada al usarse distintas variedad de maíz que los agricultores mexicanos han desarrollado por lo menos hace 700 años, buscando las adecuaciones de la planta ante diversas condiciones

climáticas. Las cuales no se tomaron en cuenta en este trabajo. Los cambios en aptitud de los distintos escenarios de emisiones con respecto al escenario base se pueden ver en la figura 3.1.1.2.

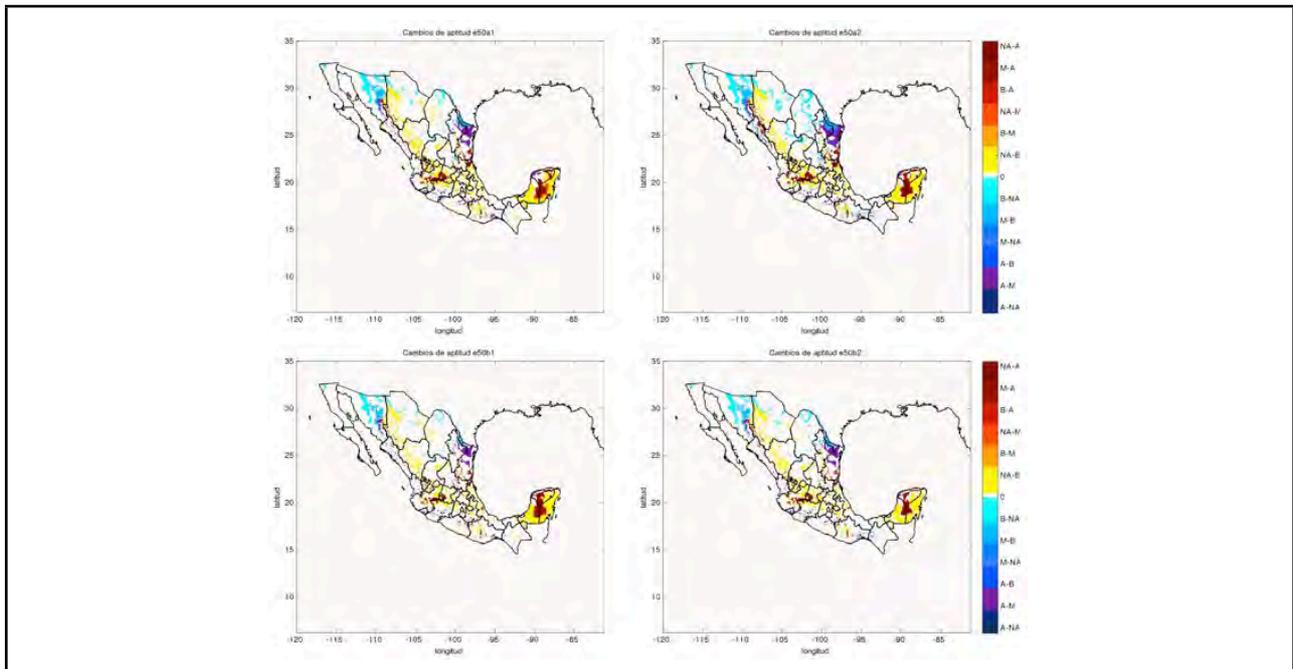


Figura 3.1.1.2 Mapas de diferencia de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo ECHAM para el horizonte 2050 con respecto al escenario base.

### 3.1.2 Resultados del modelo GDFL para el horizonte 2050 utilizando solo las variables climáticas.

Para la familia generada por modelo GDFL (figura 3.1.2.1), se muestra una disminución en las zonas aptas y en las zonas no aptas y mostrando una tendencia de incrementarse las zonas con aptitud media y baja, en especial las medias con una aumento mayor al 20% con respecto al escenario base. El estado de Tamaulipas presenta los cambios más drásticos en su aptitud para el cultivo, al presentares condiciones climáticas más adversas para el cultivo, al igual en la zona de la península de Yucatán, tendencia que se hace notar en los cuatro escenarios de emisiones. Mientras que la zonas con un aumento en la aptitud en la zona central y noroeste. Estas tendencias pueden verse en los mapas de la figura 3.1.2.2. El escenario B1 es el que menores cambios presenta en cambio el A2 es el más pesimista de los cuatro.

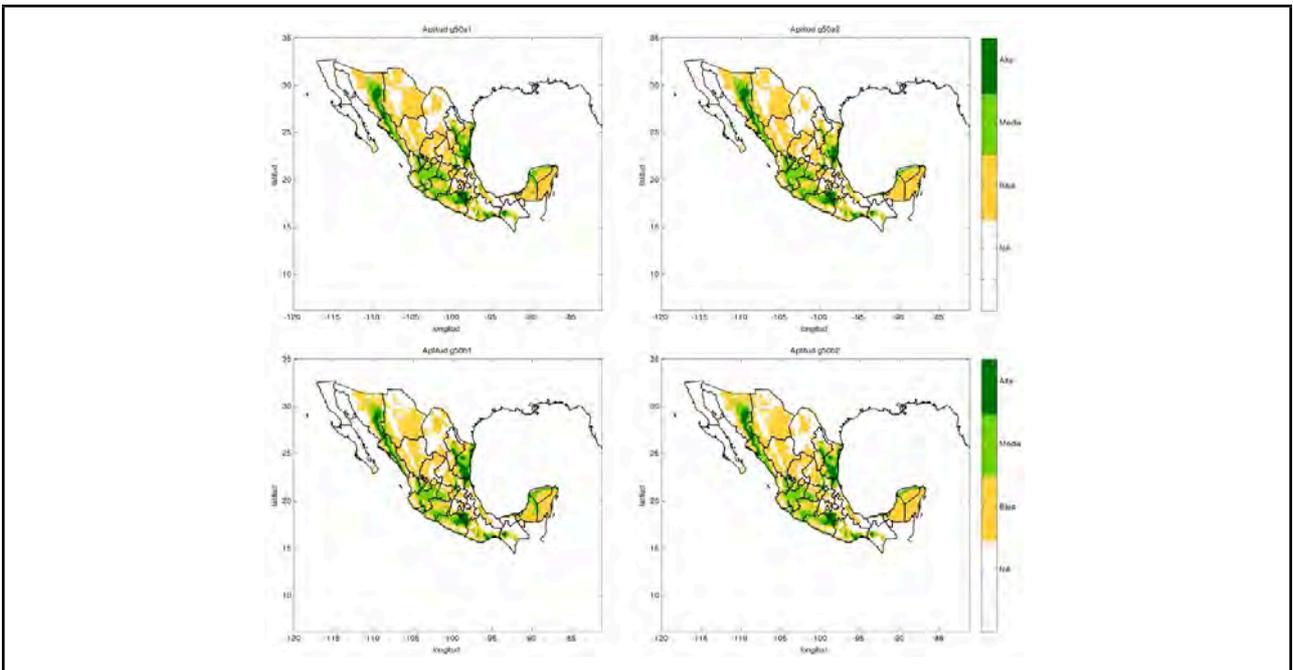


Figura 3.1.2.1 Mapas de aptitud con temperatura y precipitación para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo GDFL para el horizonte 2050.

En general con los cambios que presenta este modelo en las condiciones climáticas para el 2050, se observa en la figura 3.1.2.2 un cambio positivo en el lado oeste del país, incluso en las zonas desérticas pasa de ser no apto a una aptitud baja. La disminución en la aptitud se da tanto en el estado de Tamaulipas al Noreste del país como en la península de Yucatán, y ciertas zonas en el estado de Sinaloa

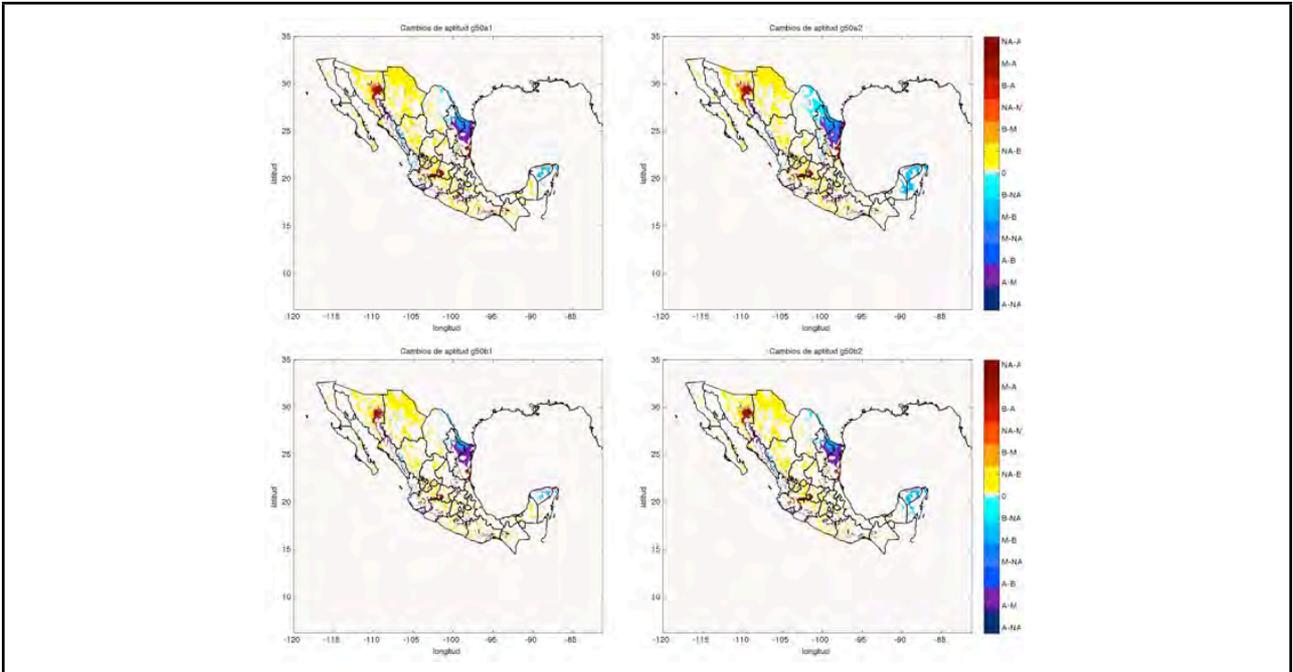


Figura 3.1.2.2 Mapas de diferencia de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo GDFL para el horizonte 2050 con respecto al escenario base.

### 3.1.3 Resultados del modelo HADLEY para el horizonte 2050 utilizando solo las variables climáticas.

Este es el modelo con las salidas con mejoras en la aptitud para el maíz de temporal en general, ya que con respecto al escenario base aumentan tanto la aptitud alta, media y baja, y disminuyen en las zonas no aptas por encima del 20%. El estado de Tamaulipas sigue presentando una alta aptitud al igual que la zona a lo largo de la Sierra Madre Occidental esto se puede observar en los mapas de la figura 3.1.3.1. El escenario A2 es el que presenta una mayor disminución en la aptitud del maíz de temporal y el B1 menor cambio.

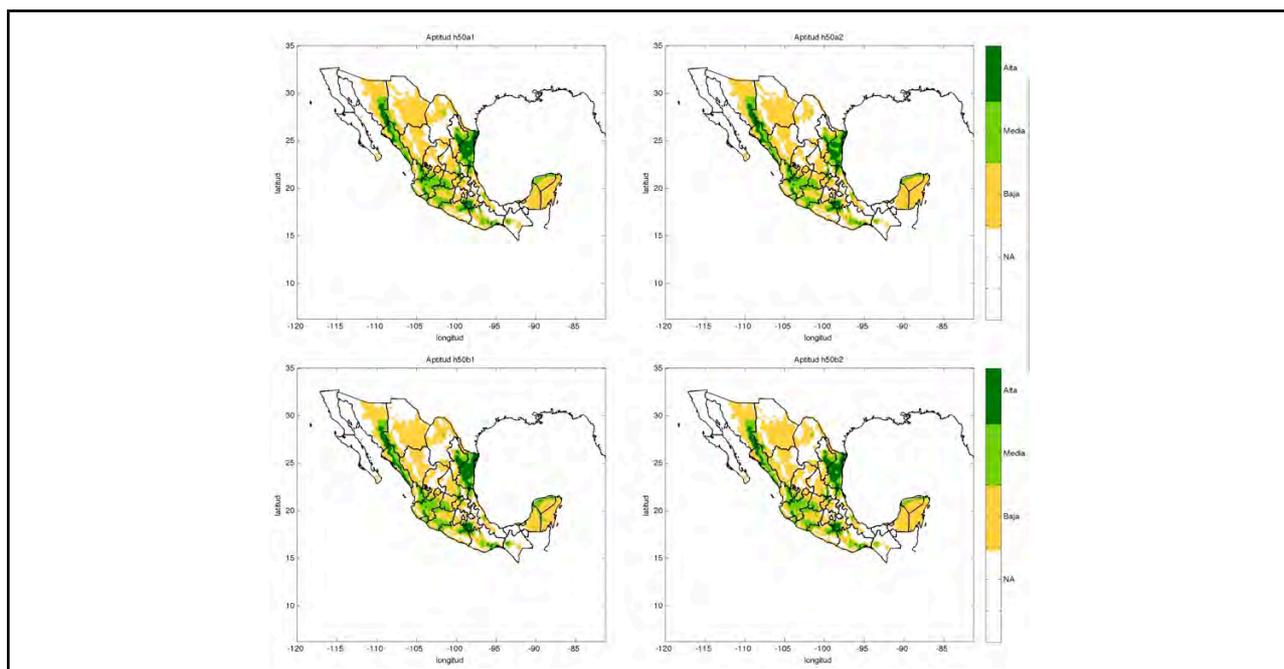


Figura 3.1.3.1 Mapas de aptitud con temperatura y precipitación para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo HADLEY para el horizonte 2050.

En general se dan los cambios positivos en la zona desértica pasando de no apta a baja, También en las zonas del centro donde las aptitudes medias pasan a ser altas. Las perdidas en aptitud se dan en la parte norte del estado de Tamaulipas, Nuevo León Zacatecas y San Luis Potosí y en la parte sur la península de Yucatán, así como ciertas zonas en Guerrero y Oaxaca como se observa en los mapas de la figura 3.1.3.2. En estos mapas también se puede observar que para el escenario A2 están más marcadas las tendencias de cambio que para el escenario B1.

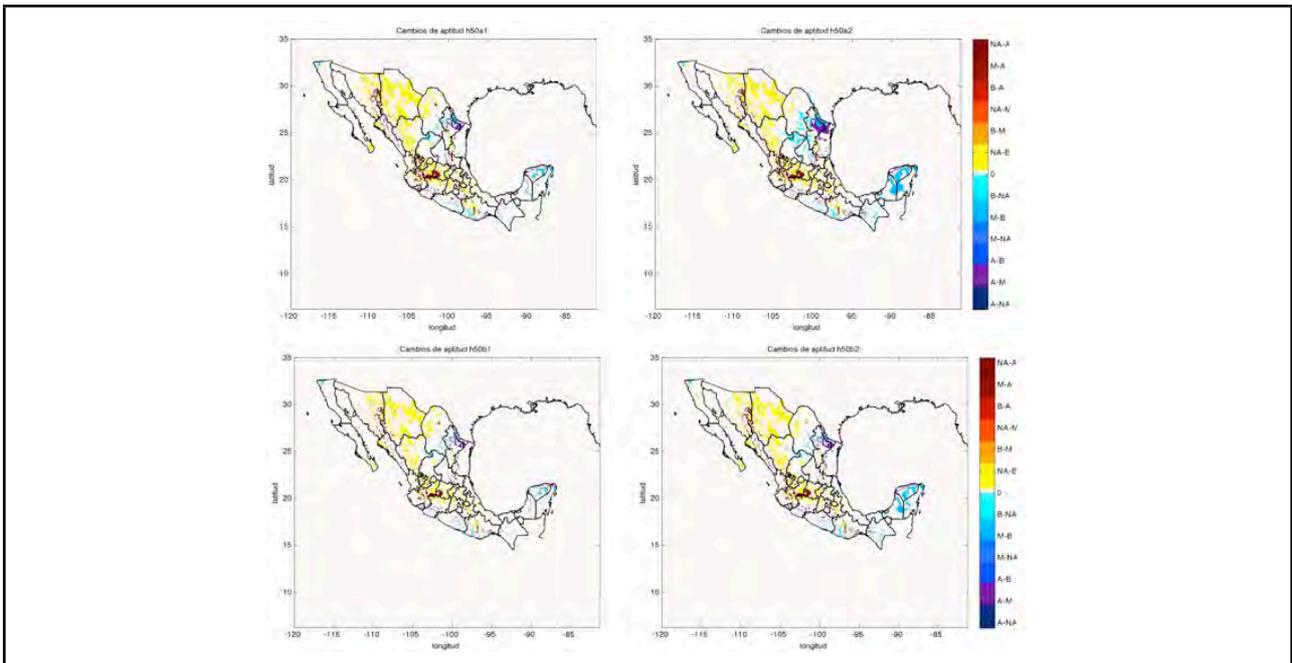


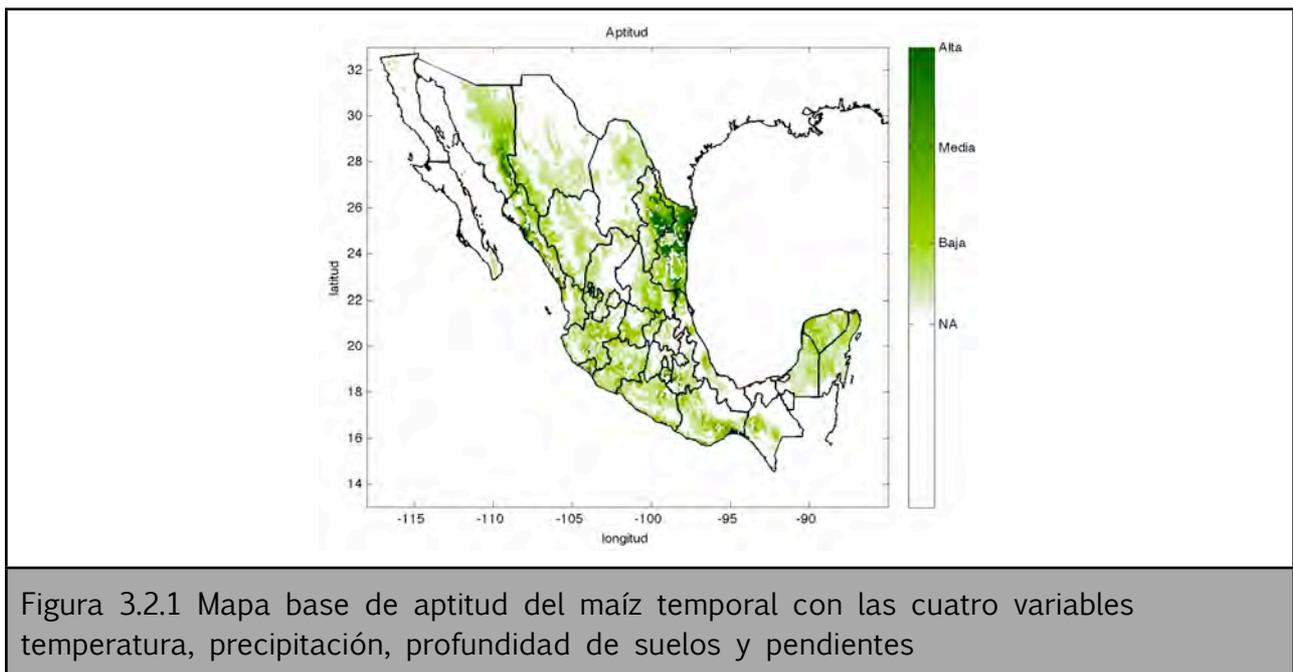
Figura 3.1.3.2 Mapas de diferencia de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo HADLEY para el horizonte 2050 con respecto al escenario base.

Todos los resultados anteriores muestran que para el horizonte del 2050, habría un cambio en la aptitud del maíz de temporal en México. Los escenarios del HADLEY se muestran menos cambios en la aptitud que los otros escenarios, esto a que el cambio en precipitación no es tan marcado como en los otros modelos. Los cambios son más marcados en el ECHAM, ya que tiene el mayor aumento de temperatura y en la precipitación. A pesar que el GDFL tiene el menor cambio en la temperatura, los cambios también son muy marcados por el aumento en la precipitación. En general para los tres modelos el escenario A2 es el más negativo en cambio el B1 presenta menores cambios en la aptitud del maíz de temporal.

### 3.2 Resultados del modelo difuso con las cuatro variables

Las zonas con mayor aptitud se notan más restringidas al incrementarse el número de variables de las cuales depende el desarrollo del cultivo del maíz de temporal. A diferencia del modelo anterior las variables están a una resolución de 1x1km como se menciona en el capítulo 2.3.

En la figura 3.2.1 se observa que Tamaulipas y Nuevo León siguen siendo los estados con mayor cobertura de área con aptitud alta. A lo largo de la Sierra Madre Occidental se pierde aptitud mostrada en la sección anterior al tener pendientes no aptas para el cultivo. En la zona de la península disminuye la aptitud debido a la poca profundidad del suelo.



La clasificación del mapa permite que se observen los cambios de manera más clara, como se puede ver en la figura 3.2.2. La clasificación se hizo acorde a los valores que se presentan en los intervalos de aptitud de la salida de el modelo difuso con las cuatro variables como se mostró en el capítulo 2 (ver figura 2.3.6).

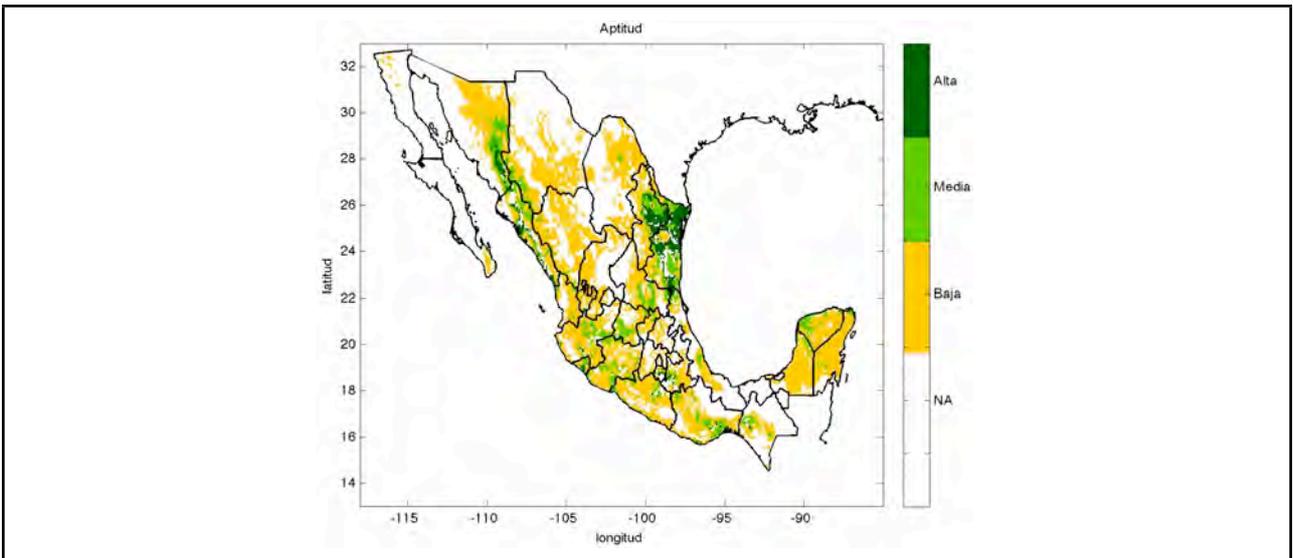


Figura 3.2.2 Mapa base de aptitud del maíz temporal con las cuatro variables temperatura, precipitación, profundidad de suelos y pendientes clasificado

Los porcentajes que cubren las distintas aptitudes se ve una alza en las áreas no aptas de 37.4% a 48.9%, bajas de 39.5% a 40.3%, medias de 15.2% a 7.8% en comparación con el modelo que solo utiliza las variables climáticas (tabla 3.1.1). Las zonas no aptas cubren casi el 50% del territorio nacional, como se muestra en la tabla 3.2.1.

Tabla 3.2.1 Porcentaje de las áreas con distintas aptitudes del mapa base.			
Alta	Media	Baja	No Apta
2.95%	7.78%	40.34%	48.93%

Dada la importancia cultural y alimentaria del maíz, y al ser el cultivo que ocupa la mayor superficie cultivable es importante notar su distribución. Se usó el mapa de uso del suelo y vegetación (INEGI 2005), del cual se obtuvieron las localizaciones de uso de suelo de agricultura de temporal el cual se muestra en verde oscuro en el mapa de la figura 3.2.3.



Figura 3.2.3 Mapa de uso de suelo y vegetación de México (INEGI 2005)

Este mapa de uso de uso de suelo y vegetación de México para mostrar la aptitud actual donde se esta produciendo maíz de temporal en México.

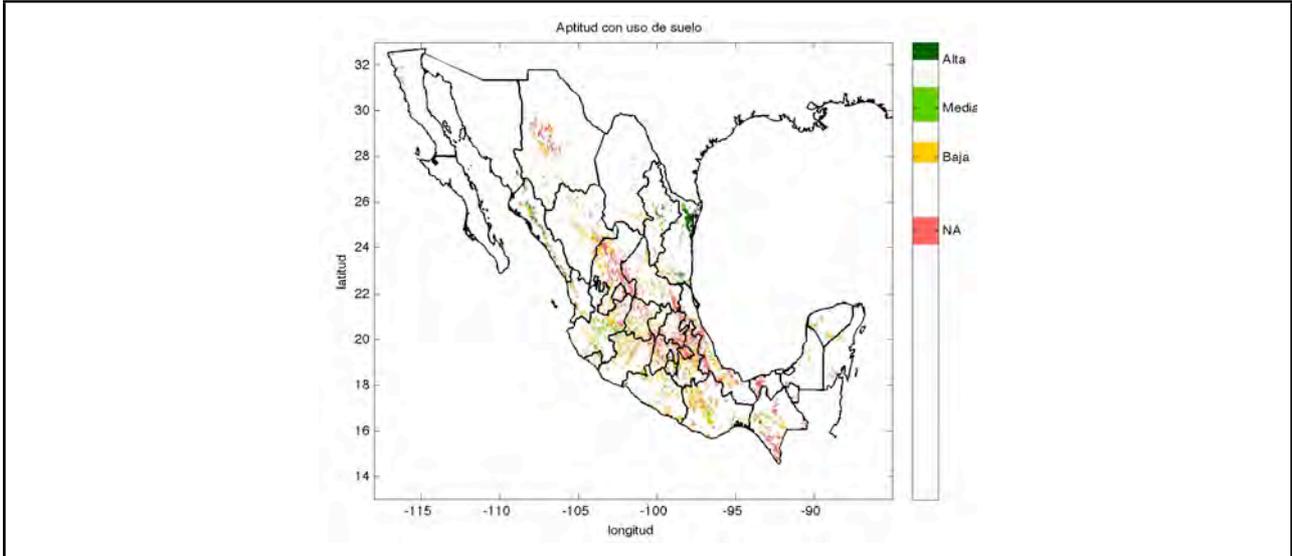


Figura 3.2.4 Mapa base de aptitud del maíz temporal con uso de suelo las cuatro variables temperatura, precipitación, profundidad de suelos y pendientes

Del total de la de la superficie de suelo del país un 11% del país tiene como uso de suelo la agricultura temporal, apenas el 5% se encuentra en las zonas aptas, el 9.5% en las zonas con aptitud media, 41% en las bajas y 44.5% en las no aptas para el cultivo de maíz. Hoy en día ya se utiliza casi el 20% del 5% de las tierras aptas disponibles para el maíz de temporal (ver tabla 3.2.2), el otro 80% en una gran proporción se encuentran ocupadas por agricultura de riego, y el de mayor proporción por vegetación. Con las proyecciones a futuro se podrían generar políticas públicas para favorecer el uso de las tierras más aptas para este cultivo, así como la prevención de perdidas mejorando los paquetes tecnológicos que consideren el cambio climático y sugiriendo variedades de maíz mejor adaptados al clima, suelo, plagas, etc.

Tabla 3.2.2 Porcentaje del área usada por agricultura temporal de las distintas aptitudes del mapa base.

Alta	Media	Baja	No Apta
18.49%	13.08%	10.83%	9.68%

### 3.2.1 Resultados del modelo ECHAM para el horizonte 2050

Los cambios de aptitud en las distintas familias (ver figura 3.2.1.1) de este modelo proyectan una disminución del 20% de las zonas con aptitud alta, menos para la familia A2 que presenta la mayor disminución cerca del 40% lo cual representa considerables pérdidas de tierras aptas para la agricultura de maíz de temporal.

Se ve un incremento en la superficie con aptitud media con respecto al escenario base y una ligera disminución en las zonas no aptas, los porcentajes se pueden ver en la tabla 3.2.1.1.

Tabla 3.2.1.1 Porcentaje de cambio de las áreas con distintas aptitudes con respecto al mapa base para los escenarios ECHAM del 2050.

Escenario	Alta	Media	Baja	No Apta
E50a1	-26.95%	45.94%	1.55%	-6.96%
E50a2	-42.27%	35.49%	-3.51%	-0.21%
E50b1	-20.03%	38.02%	1.53%	-6.11%
E50b2	-26.97%	37.83%	1.04%	-5.25%

\*Notación ECHAM (E), horizonte 2050 (50), escenarios de emisiones (a1, a2, b1, b2).

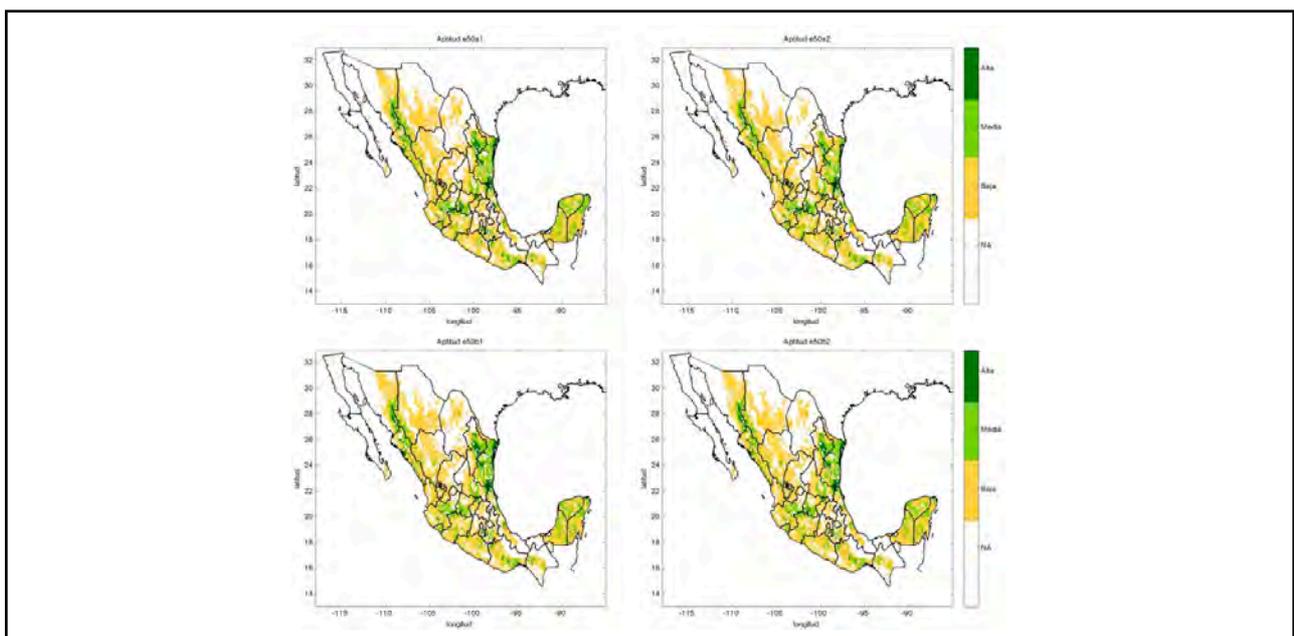


Figura 3.2.1.1 Mapas de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo ECHAM para el horizonte 2050.

Se observa la misma tendencia de cambio que tuvo el modelo difuso con solo las variables climáticas. También se observa un cambio negativo en la parte norte del país y aumentos positivos en la zona centro y sur del país. Estos cambios están más restringidos debido a las variables de la pendiente y profundidad de suelo que se mantienen como constante (ver figura 3.2.1.2).

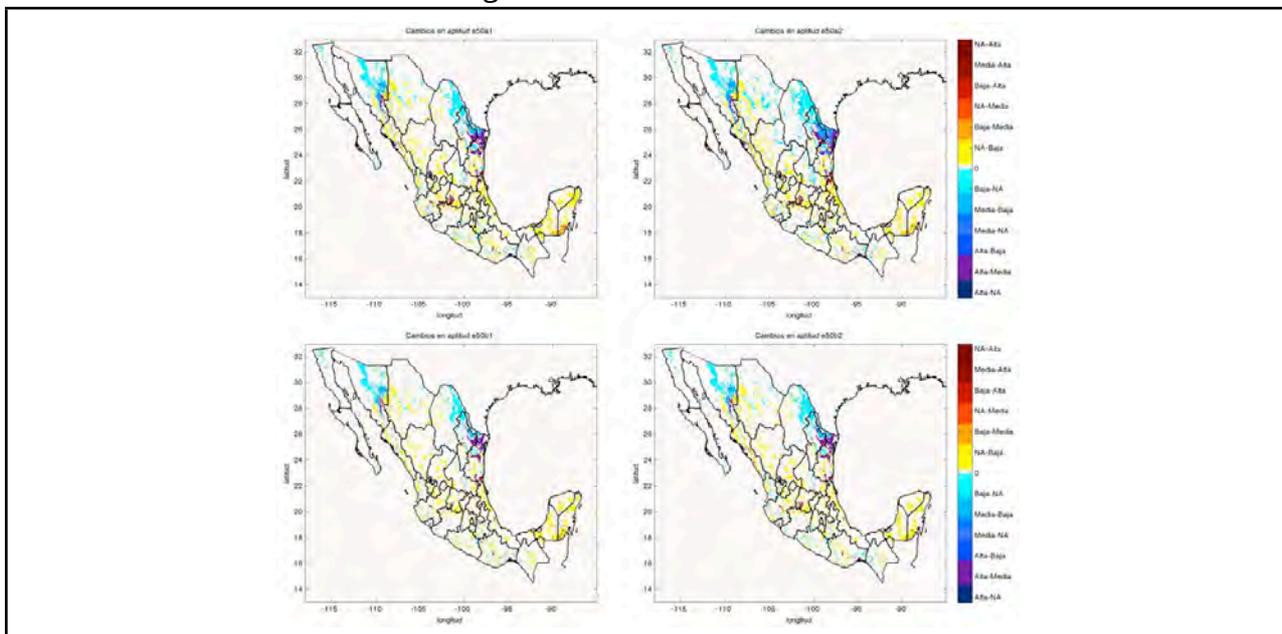


Figura 3.2.1.2 Mapas de diferencia de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo ECHAM para el horizonte 2050 con respecto al escenario base.

El escenario de emisiones A2 es el que mayor cambio presenta hacia una pérdida en la aptitud para el maíz de temporal. Mientras que el escenario B1 es el de menor cambio. Las tendencias son similares a los resultados de la sección anterior pero los incrementos tan marcados en la península se ven reducidos al tener una poca profundidad de suelo.

### 3.2.2 Resultados del modelo GDFL para el horizonte 2050

Para la familia generada por modelo GDFL ver figura 3.2.2.1, se muestra una disminución en las zonas aptas y en las zonas no aptas, mostrando una tendencia a la alza las zonas con aptitud media y baja, en especial las medias con una aumento mayor al 20% con respecto al escenario base (ver tabla 3.2.2.1).

Tabla 3.2.2.1 Porcentaje de cambio de las áreas con distintas aptitudes con respecto al mapa base para los escenarios GDFL del 2050.				
Escenario	Alta	Media	Baja	No Apta
G50a1	-23.31%	29.49%	22.78%	-22.07%
G50a2	-27.17%	21.11%	19.30%	-17.64%
G50b1	-24.85%	26.38%	18.97%	-18.34%
G50b2	-25.47%	25.25%	19.34%	-18.43%

\*Notación GDFL (G), horizonte 2050 (50), escenarios de emisiones (a1, a2, b1, b2).

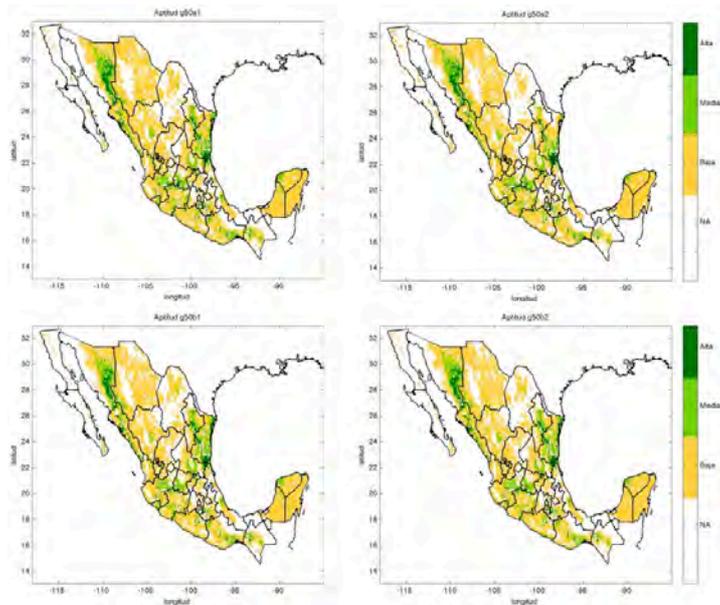


Figura 3.2.2.1 Mapas de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo GDFL para el horizonte 2050.

Los cambios más importantes en aptitud se dan en la parte norte del estado de Tamaulipas, pero a un menor grado que con solo las variables climáticas. Estos cambios también se dan en la parte desértica del área con aumento en la aptitud pasando de no apta a baja pero con un impacto menor como se puede ver en los mapas de la figura 3.2.2.2.

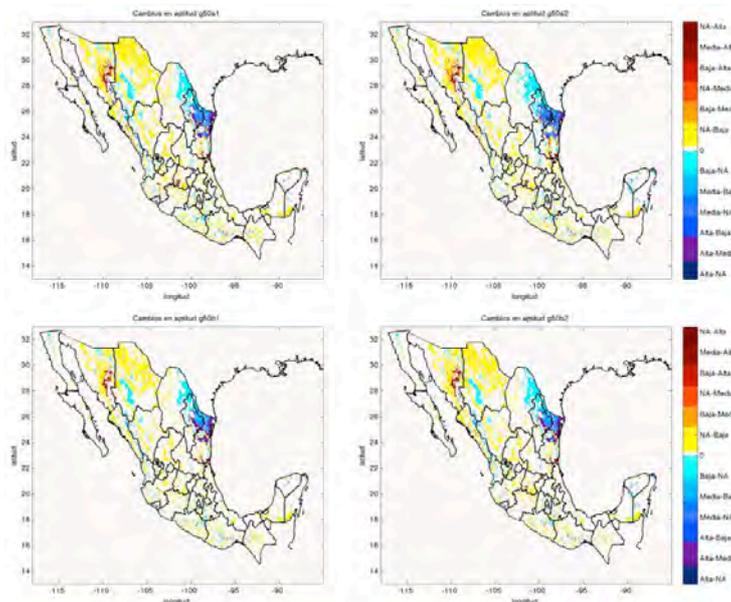


Figura 3.2.2.2 Mapas de diferencia de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo GDFL para el horizonte 2050 con respecto al escenario base.

Para el modelo GDFL los escenarios de emisiones guardan una proporción muy similar sin que ninguno de estos se muestre un mayor pérdida que el otro, como el modelo anterior del ECHAM donde el escenario A2.

### 3.2.3 Resultados del modelo HADLEY para el horizonte 2050

Para este modelo notamos en la figura 3.2.3.1 una tendencia similar a la del GDFL, donde hay una disminución de las zonas aptas y no aptas con respecto al escenario base y un aumento de las zonas con aptitud media y baja. En las zonas medias, se tiene un aumento significativo con respecto al escenario base por encima del 20%, los resultados en el porcentaje se presentan en la tabla 3.2.3.1 al igual que en los mapas de la figura 3.2.3.1

Tabla 3.2.3.1 Porcentaje de cambio de las áreas con distintas aptitudes con respecto al mapa base para los escenarios HADLEY del 2050.				
Escenario	Alta	Media	Baja	No Apta
H50a1	1.52%	26.91%	15.35%	-17.03%
H50a2	-18.30%	25.64%	10.60%	-11.72%
H50b1	-1.07%	21.42%	12.80%	-13.89%
H50b2	-3.96%	21.75%	12.28%	-13.35%

\*Notación HADLEY (H), horizonte 2050 (50), escenarios de emisiones (a1, a2, b1, b2).

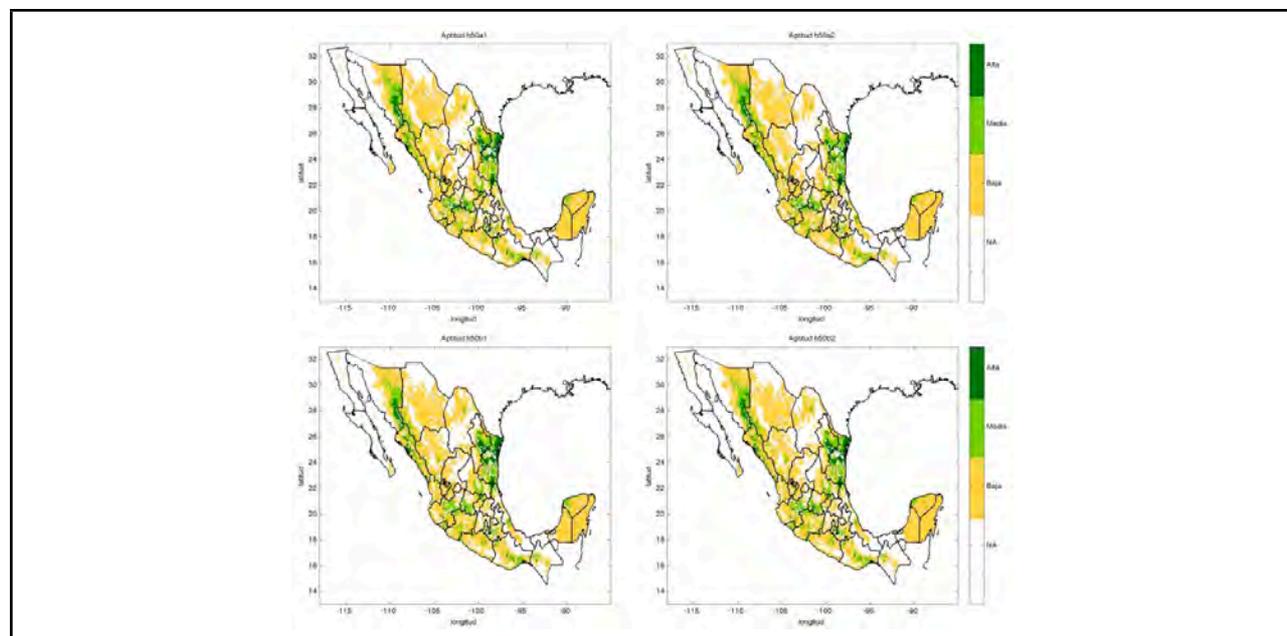


Figura 3.2.3.1 Mapas de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo HADLEY para el horizonte 2050.

Los cambios se dan de manera similar a los resultados del modelo usando los escenarios del GDFL donde la parte Noreste disminuye en aptitud y la parte Noroeste aumenta ver los mapas en la figura 3.2.3.2. Los cambios de menor aptitud están más marcados en el sur que en los resultados del modelo utilizando los escenarios del GDFL (figura 3.2.2.2).

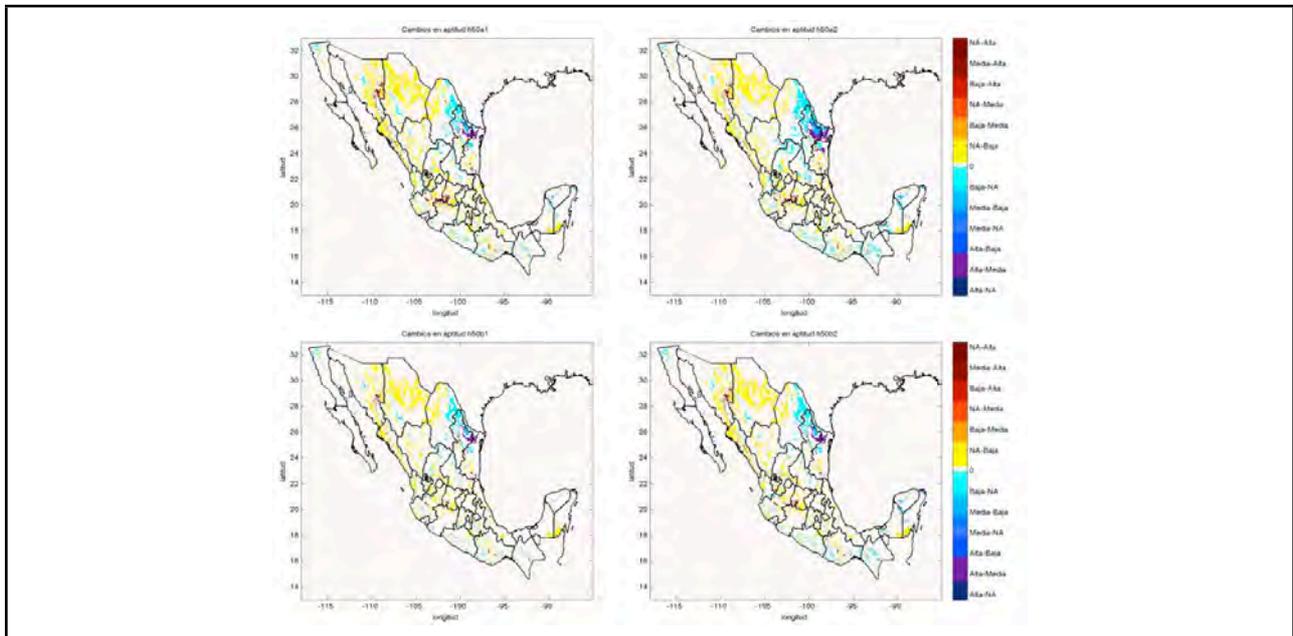


Figura 3.2.3.2 Mapas de diferencia de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo HADLEY para el horizonte 2050 con respecto al escenario base.

El escenario de emisiones A2 presenta el mayor cambio en las zonas aptas, mucho mayor que para los otros escenarios. El escenario B1 es de menor cambio. Para el escenario A1 se da la mayor disminución de las tierras no aptas, las cuales aumentan en aptitud para ser zonas de aptitud baja.

En síntesis, la introducción de la pendiente y profundidad de suelos, los resultados se ven amortiguados en comparación a los resultados donde sólo se utilizaron las variables climáticas, sobre todo en las zonas donde se tiene la presencia de las sierras como la Sierra Madre Occidental, la Sierra de Zacatecas, y el Eje Volcánico, las cuales afectan la aptitud de los estados de Sonora, Coahuila, Nayarit, Jalisco, Michoacán, Oaxaca, Morelos, el Estado de México, y zonas como en la península de Yucatán que los suelos son poco profundos al igual que la zona centro del país.

### 3.4 Estudio de caso: Puebla

El municipio de Tehuacán localizado al suroeste del estado de Puebla es considerado como la cuna del maíz. Restos arqueológicos demuestran que fue habitado desde hace ocho mil quinientos años antes de nuestra era (a.c.). Allí encontraron el fósil de maíz más antiguo del mundo. Este lugar fue habitado por los Popolocas, quienes fueron los primeros domesticadores del cultivo. En los años setentas, 45% de la superficie sembrada estaba destinada al maíz, y cinco estados concentraban el 40% de la superficie: Veracruz, Puebla, Jalisco, Oaxaca y Michoacán (Escobedo 1988). Hoy en día en el estado de Puebla el maíz concentra el 62% de la superficie cultivada, 70% de la producción se desarrolla bajo temporal, y el 80% de la siembra son maíces criollos (Viveros Flores 2010). La zona con mayor aptitud se encuentra al suroeste del estado (ver figura 3.4.1) la mayoría del estado tiene una baja aptitud para este cultivo (ver tabla 3.4.1).

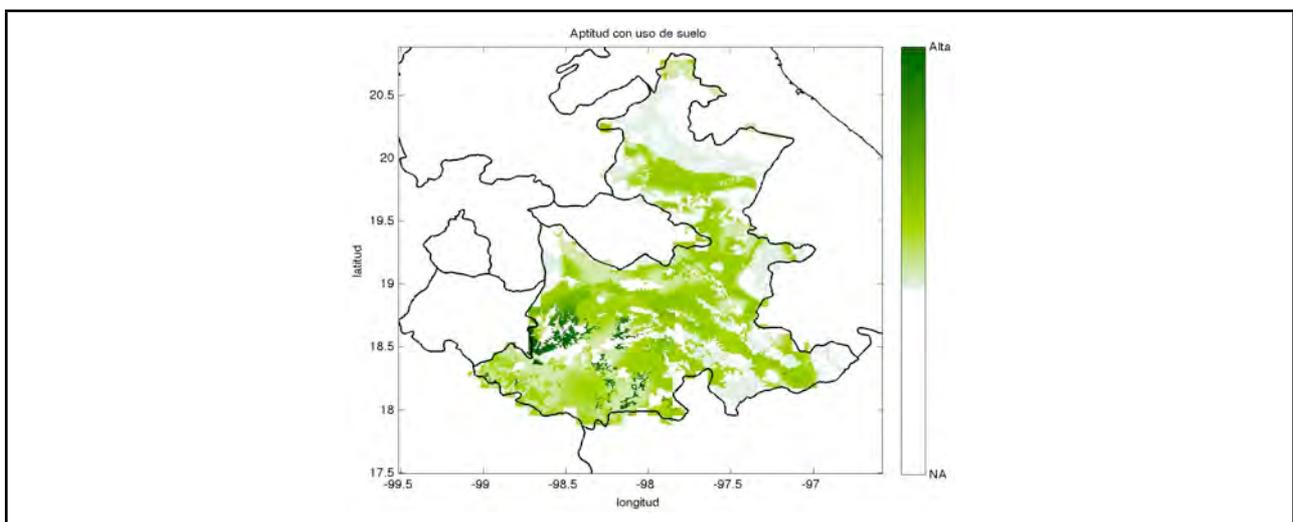


Figura 3.4.1 Mapa base de Puebla con las cuatro variables temperatura, precipitación, profundidad de suelos y pendientes

Tabla 3.4.1 Porcentaje de las áreas con distintas aptitudes del mapa base de Puebla.

Alta %	Media %	Baja %	No Apta %
3.21	3.05	55.08	27.29

La clasificación de las aptitudes en el estado denota una cobertura amplia para la aptitud del cultivo, aunque ésta sea de baja denominación, ver figura 3.4.2.

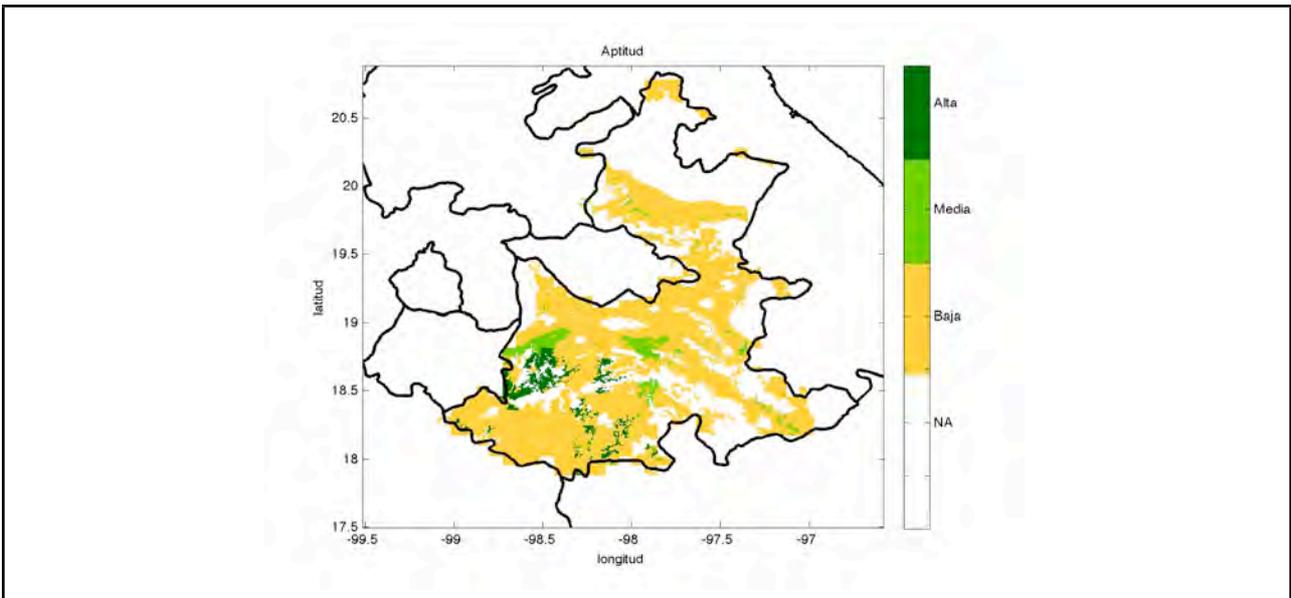


Figura 3.4.2 Mapa base de Puebla con las cuatro variables temperatura, precipitación, profundidad de suelos y pendientes clasificado

Para los tres modelos de circulación se presentan aumentos en la aptitud al mejorarse las condiciones climáticas para el cultivo del maíz de temporal. Los aumentos se dan de manera similar. Las zonas con una alta aptitud se quedan con un ligero aumento. El mayor cambio se da en la zona con una aptitud media formando un cinturón en la parte media del estado.

### 3.4.1 Resultados del modelo ECHAM para el horizonte 2050 para Puebla

Los aumentos se dan próximos a las áreas que presentan una alta y media aptitud (ver figura 3.4.1.1). Al estar en la zona centro del país y dada la proyección del modelo, la aptitud incrementará al presentarse mejores condiciones climáticas. Las zonas con aptitud media, tienen el mayor incremento (ver tabla 3.4.1.1), al incrementarse la aptitud por encima del 100% con respecto al escenario base, mientras que las áreas con aptitud alta se incrementan alrededor del 10%.

Tabla 3.4.1.1 Porcentaje de cambio de las áreas con distintas aptitudes con respecto al mapa base de Puebla para los escenarios ECHAM del 2050.

Escenario	Alta	Media	Baja	No Apta
E50a1	12.56%	130.10%	2.78%	-2.24%
E50a2	12.42%	131.20%	2.92%	-2.28%
E50b1	9.28%	108.60%	2.11%	-1.81%
E50b2	10.66%	117.90%	1.91%	-1.89%

\*Notación ECHAM (E), horizonte 2050 (50), escenarios de emisiones (a1, a2, b1, b2).

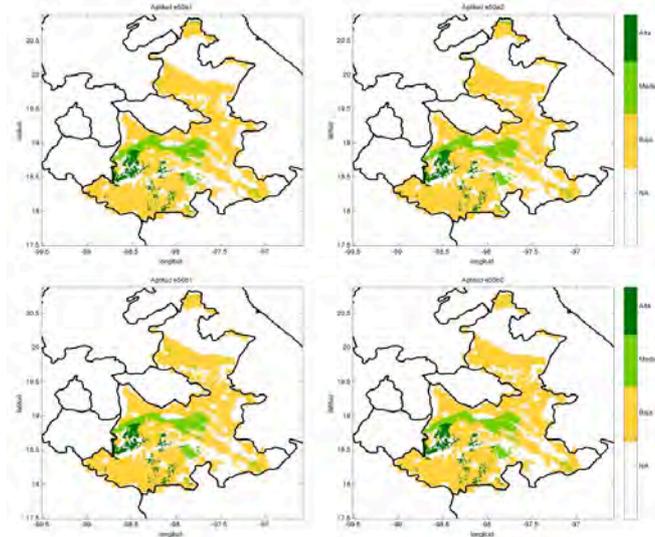


Figura 3.4.1.1 Mapas de aptitud con temperatura y precipitación para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo ECHAM para el horizonte 2050.

La mayoría de los cambios son hacia la mejora en la aptitud (figura 3.4.1.2), y los pocos cambios negativos se dan en las tierras con una baja aptitud a no aptas. Las áreas tanto con una aptitud alta y media no presentan ninguna disminución.

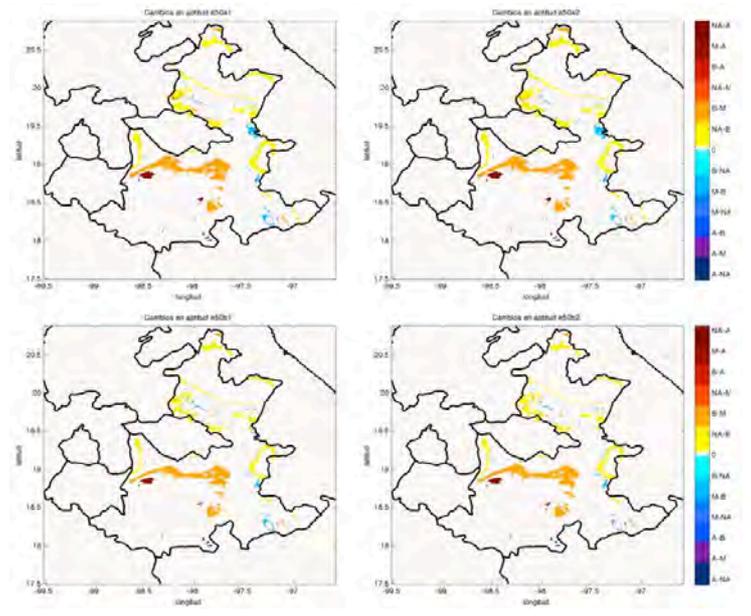


Figura 3.4.1.2 Mapas de diferencia de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo ECHAM para el horizonte 2050 con respecto al escenario base.

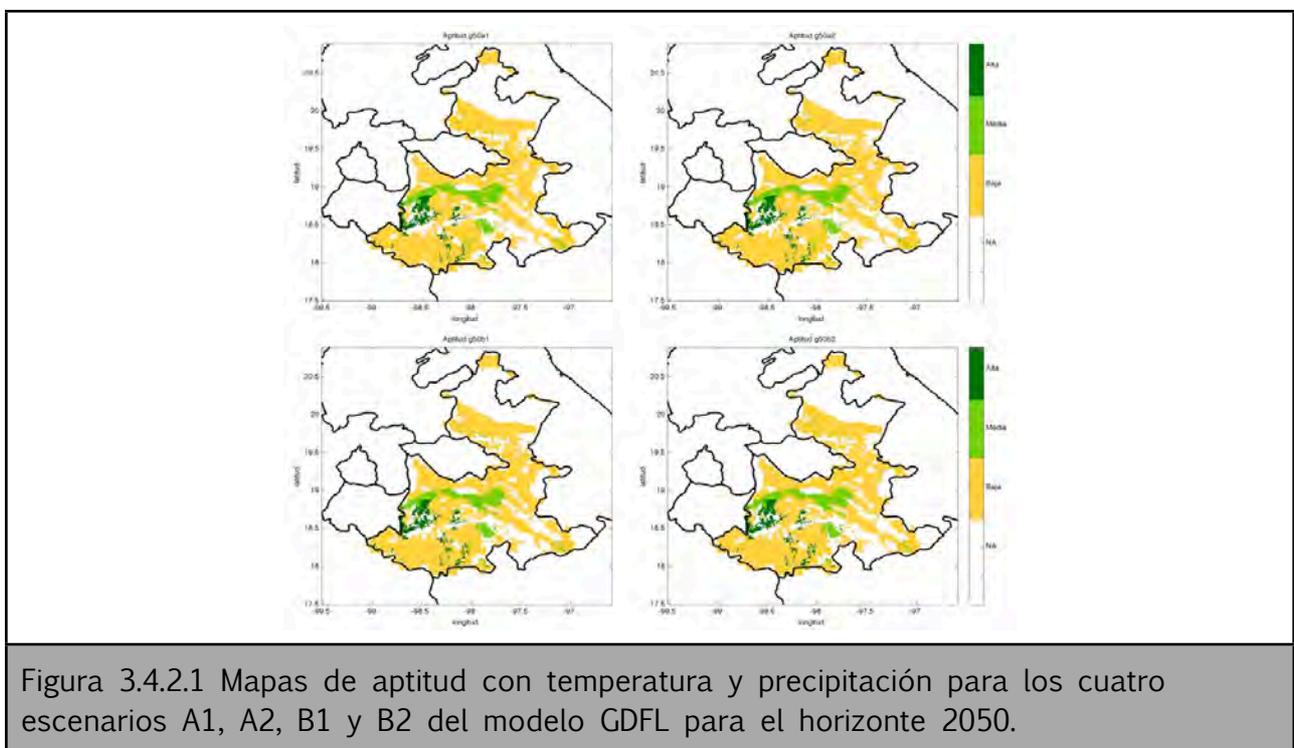
### 3.4.2 Resultados del modelo GDFL para el horizonte 2050 para Puebla

Al igual que para el modelo ECHAM, los mapas muestran un incremento de la aptitud en general (figura 3.4.2.1) pero el incremento no es tan marcado como en los resultados para los escenarios de ECHAM, dado que los porcentajes son menores (tabla 3.4.2.1). Las zonas con aptitud media incrementarán por debajo del 100%, estado todavía muy alto,

pero las zonas con una aptitud alta solamente aumentan en un 5% para todos los escenarios de emisiones.

Tabla 3.4.2.1 Porcentaje de cambio de las áreas con distintas aptitudes con respecto al mapa base de Puebla para los escenarios GDFL del 2050.				
Escenario	Alta %	Media %	Baja %	No Apta %
G50a1	5.19%	96.61%	1.24%	-1.44%
G50a2	4.82%	87.75%	1.40%	-1.37%
G50b1	5.19%	84.36%	0.31%	-1.10%
G50b2	7.23%	88.75%	0.00%	-1.11%

\*Notación GDFL (G), horizonte 2050 (50), escenarios de emisiones (a1, a2, b1, b2).



Los cambios se presentan de manera similar al modelo ECHAM, donde la única disminución en la aptitud se da en zonas con baja aptitud a no aptas. El aumento de las zonas de aptitud alta y media se da en las proximidades de las ya existentes (figura 3.4.2.2).

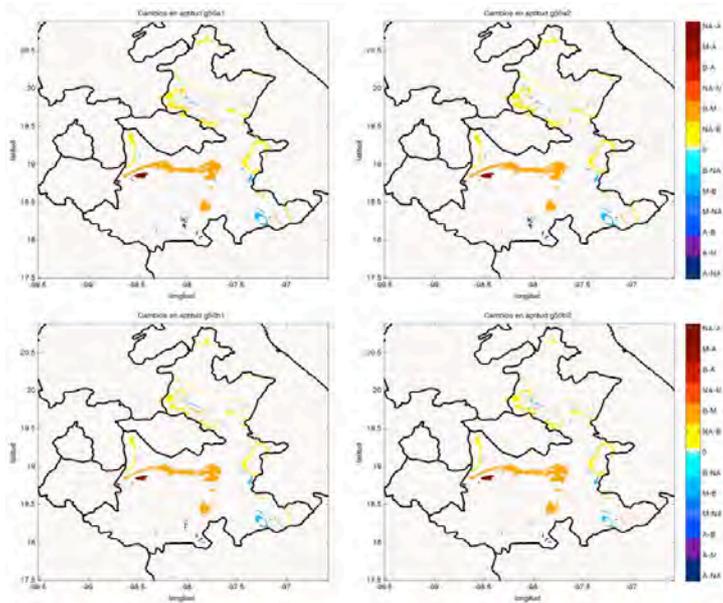


Figura 3.4.2.2 Mapas de diferencia de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo GDFL para el horizonte 2050 con respecto al escenario base.

### 3.4.3 Resultados del modelo HADLEY para el horizonte 2050 para Puebla

Los resultados con los escenarios del modelo HADLEY para el 2050, también tienen una fuerte alza en zonas con aptitudes altas (>10%) y las zonas con aptitudes medias (>110%). De acuerdo a las proyecciones las zonas con aptitud media van a presentar las mismas tendencias que en los resultados anteriores para los otros modelos de circulación. (Ver tabla 3.4.3.1 y los mapas en la figura 3.4.3.1)

Tabla 3.4.3.1 Porcentaje de cambio de las áreas con distintas aptitudes con respecto al mapa base de Puebla para los escenarios HADLEY del 2050.

Escenario	Alta %	Media %	Baja %	No Apta %
H50a1	12.64%	130.00%	0.82%	-1.83%
H50a2	11.10%	127.70%	0.88%	-1.80%
H50b1	8.62%	105.30%	0.12%	-1.35%
H50b2	9.28%	116.30%	-0.07%	-1.44%

\*Notación HADLEY (H), horizonte 2050 (50), escenarios de emisiones (a1, a2, b1, b2).

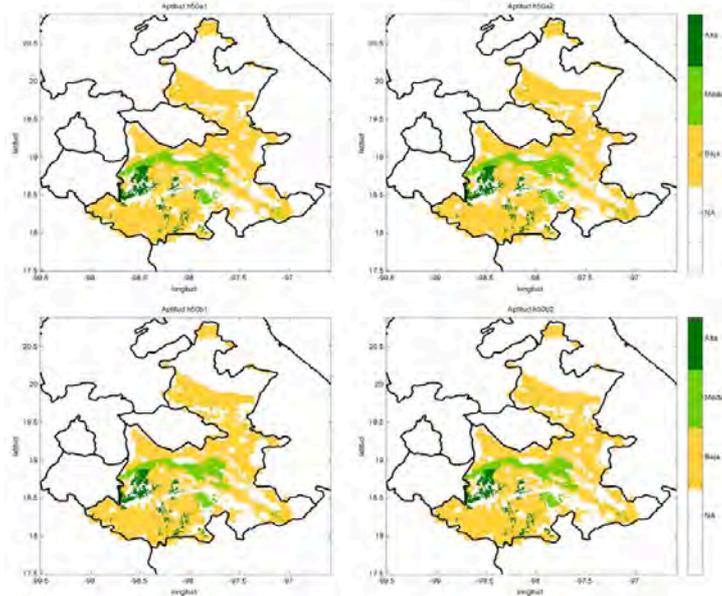


Figura 3.4.3.1 Mapas de aptitud con temperatura y precipitación para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo HADLEY para el horizonte 2050.

Los cambios en la aptitud se están presentando de la misma manera que los anteriores modelos con sutiles diferencias. (Mapas en la figura 3.4.3.2)

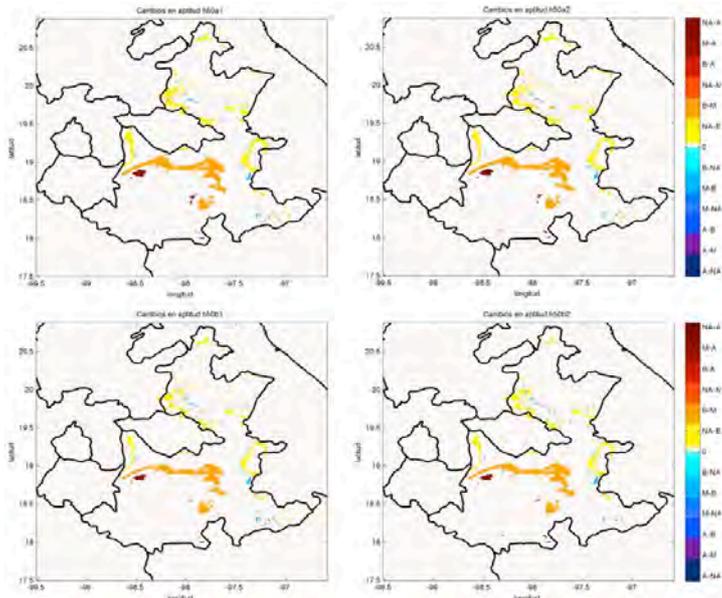


Figura 3.4.3.1 Mapas de diferencia de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo HADLEY para el horizonte 2050 con respecto al escenario base.

Para todos los modelos se nota un aumento en la aptitud para el maíz de temporal con respecto al escenario base, ya que para todas las categorías donde se tiene algún nivel de aptitud, la aptitud aumenta y en las zonas no aptas no disminuye a pesar de que en el promedio general para el estado los cambios no son tan notorios y los cambios son menores con respecto al escenario base (como se puede ver en la tabla 5.3.1 que se encuentra en el anexo).

### 3.4.4 Uso de suelo, agricultura temporal.

El cultivo de maíz es importante en el estado de Puebla al concentrar el 62% de la superficie cultivada, del la cual el 80% se cultiva bajo las condiciones de temporal. Usando el mapa de uso de suelo y vegetación (INEGI 2005), se delimitaron las zonas con práctica de agricultura de temporal (ver mapa izquierdo en la figura 3.4.4.1). De acuerdo con estos datos la agricultura de temporal ocupa un 28% de las zonas con aptitud alta, el 38% de las áreas con aptitud media y baja, y el 32% de las áreas no aptas (tabla 3.4.4.1). La mayoría de las áreas con uso de suelo de agricultura de temporal están situadas en áreas de aptitud baja.

Tabla 3.4.4.1 Porcentaje de las áreas de distintas aptitudes utilizadas en la agricultura temporal en Puebla.

Alta	Media	Baja	No Apta
28.34%	38.21%	37.89%	32.18%

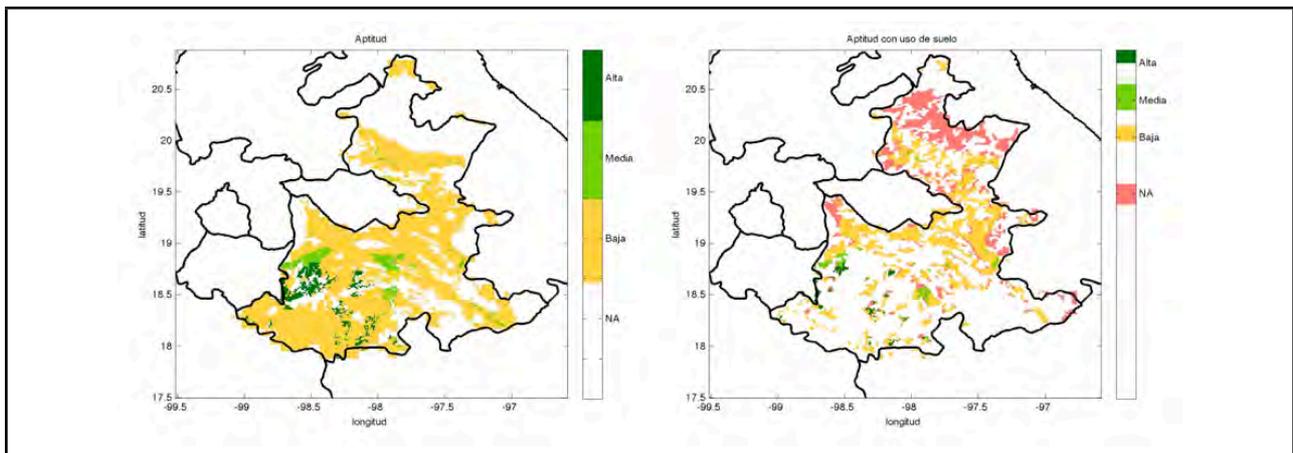


Figura 3.4.4.1 A la izquierda el mapa de Puebla aptitud base y a la derecha mapa de aptitud base de Puebla con el uso de suelo para la agricultura temporal

## 4. Conclusiones

El modelo construido permitió realizar una evaluación de un índice de la aptitud para el maíz de temporal. La variedad de los datos de entrada, tanto para el modelo que sólo se basó en las variables climáticas, como el modelo de las cuatro variables, presentaron datos de salida mucho más ricos que los trabajos anteriores. Los datos se agruparon para facilitar: el análisis de los datos, la comparación con los trabajos anteriores, y mantener la congruencia con la metodología propuesta por la FAO. Como las funciones de membresía se traslapan, simulan mejor la fenología de la planta, ya que el crecimiento cambia de manera gradual dependiendo de los valores utilizados en esta tesis. Las funciones de membresía triangulares y trapezoidales fueron escogidas por el origen cerrado de los modelos anteriores, si se hubiesen tomado formas como la gaussiana hubiera simulado mejor el comportamiento de la planta.

Los cambios graduales por el traslape en las funciones de pertenencia, tanto de las variables de entrada como de salida, presentan una mayor graduación en la aptitud enriqueciendo así el estudio de la aptitud del maíz, ya que los datos en las fronteras de las funciones de membresía dependen de su grado de pertenencia, determinando así el intervalo de salida al que representan.

Lo anterior no se da en los estudios previos donde estas fronteras están delimitadas de manera exacta, quitando así la posibilidad de utilizar datos en más de un intervalo. Por ejemplo, 26.5°C anteriormente pertenecía al intervalo Medianamente Apto, y en cambio con las funciones de pertenencia de este modelo esta temperatura es parte de los dos intervalos alto y medio, y, dependiendo de las otras tres variables (precipitación media, pendiente y profundidad de suelo) se determina si la aptitud es alta o media en esa parte del territorio.

Cuando comparamos los mapas de aptitud usando solamente las variables climáticas podemos notar grandes diferencias en las zonas marcadas en la figura 1.4.1 en comparación con la figura 3.1.2. Por ejemplo la distribución de las zonas aptas sólo coincide con la zona sur del estado de Puebla. La otra zona apta que muestra el mapa de la figura 1.4.1 es la parte sur del estado de Veracruz, Tabasco, la frontera sur del estado de Campeche y Chiapas que son zonas donde se excede el límite de precipitación apta para el cultivo, inclusive reportada en su tabla 1.4.3 de 1000mm, pues la lluvia en esa zona es mayor a los 1500mm al año.

También la figura 1.4.1 no reporta la zona apta a lo largo de la cordillera de la Sierra Madre Occidental que se muestra en la figura 3.1.2, ni la zona que esta en el estado de Tamaulipas y Nuevo León.

Tabla 4.1 Comparación de los porcentajes de cobertura de las aptitudes de los distintos trabajos				
Trabajos\Aptitud	Alta	Media (Medianamente)	Baja (Moderadamente)	No Apta
Flores (1999)	7.6%		32.8%	59.6%
Monterroso (2006)	12.6%	26.5%	28.1%	32.8%
Monterroso (2009)	6.4%	25.1%	31.6%	36.9%
Modelo difuso 2 variables	7.9%	15.2%	39.5%	37.4%
Modelo difuso 4 variables	3%	7.8%	40.3%	48.9%

En cambio, para el modelo con las cuatro variables (figura 3.2.2), en comparación con el mapa en la figura 1.4.6, la distribución es similar excepto en la parte sur del país. En la figura 1.4.6 marca una aptitud de alta a moderada, y en el mapa generado con el modelo difuso la marca de baja a media. Esto se debe a que la profundidad del suelo en esta zona es poca, por lo que el modelo va a pesarlo de manera más severa y entonces no alcanza las aptitudes marcadas en el mapa 1.4.6.

En comparación en el trabajo de Monterroso et. Al (2009) se menciona que en efecto el suelo es poco profundo, pero éste está bien drenado al tener origen de rocas calizas, por lo que le asignaron una mayor aptitud. Pero esta variable de tipo de suelo no se encuentra señalada en la tabla de las variables utilizadas en la evaluación de la aptitud para el maíz de temporal. Para que los resultados coincidieran podríamos incluir una nueva variable referente al tipo de suelo para contrarrestar los suelos pocos profundos de la zona sur del país. También pudo haber influenciado el usar la pendiente máxima al eliminar más áreas que en los modelos anteriores.

De acuerdo con la tabla 4.1, podemos resaltar que los modelos anteriores tienen una proporción similar con el modelo difuso que sólo tomo en cuenta las variables climáticas, ya que los mapas de aptitud de maíz de temporal de Monterroso et. al(2006) y (2009) contemplan las cuatro variables.

Otra ventaja es que la evaluación de los datos en el modelo se hace de manera rápida, y los resultados se obtienen casi en tiempo real. El modelo puede correrse en cualquier tipo de computadora, ya que no requiere de una alta capacidad. El formulado de las reglas y de las funciones de membresía son fundamentales para la calibración del modelo, pero el orden de las reglas no tiene un efecto en el resultado final. El modelo permite que se den los casos extremos para poder así evaluar los factores limitantes, como en el caso del sur del país.

En los mapas del país resalta la pérdida de zonas con una aptitud alta, disminuyendo a aptitudes medias con cambio climático, al igual que una disminución de las tierras no aptas hacia bajas, presentando una ligera mejora en aptitud en la parte central del país. Pero en general la proporción de zonas altas, medias, bajas y no aptas se mantiene, como puede observarse tanto en las tablas del modelo difuso que sólo ocupa la

temperatura y precipitación (tabla 5.1.1) y el modelo que ocupa las cuatro variables (tabla 5.2.1).

Sin embargo, los porcentajes son distintos para los modelos si tomamos los valores para la aptitud alta; para el modelo con variables climáticas se tiene un porcentaje por encima del 7% y el modelo de las cuatro variables se tiene un porcentaje de 3%, así por lo general el modelo con las dos variables climáticas es más optimista, al no tener otros factores limitantes.

Además de obtener escenarios de cambio de aptitud a partir de los distintos escenarios de cambio climático, el método propuesto permite iniciar el análisis de medidas de adaptación y mitigación para los agricultores en estas zonas. Estos escenarios pueden servir igualmente para la planeación de distritos de riego al tener contempladas las zonas donde se utilizarán menores insumos para la producción de este cultivo tan básico en la dieta de los mexicanos.

Según los modelos de ECHAM, GDFL, y HADLEY, los escenarios de cambio en aptitudes son distintos, pero en todos se presenta una tendencia a la disminución en el porcentaje de las tierras aptas, y el aumento en tierras con una aptitud media y baja. Para los modelos ECHAM y GDFL se presenta una disminución de las tierras aptas, mientras que el modelo HADLEY permanece casi constante en las proporciones pero no las áreas que cubren las distintas aptitudes. Las tendencias de acuerdo con el artículo de Monterroso et. al (2009), para los escenarios en las familias A2 y B2, son similares: disminución de las áreas aptas y no aptas, y el aumento de la cobertura de tierras con una aptitud media y baja. Como se muestra en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Comparación de los resultados del (%) de la superficie Nacional de acuerdo al nivel de aptitud para el cultivo de maíz. Las primeras 7 columnas son resultados de Monterroso et. al 2009. Entre paréntesis el muestra el signo de cambio.														
Nivel de aptitud	Bas e	E50 A2	E50 B2	G50 A2	G50 B2	H50 A2	H50 B2	Bas e	E50 A2	E50 B2	G50 A2	G50 B2	H50 A2	H50 B2
Alta	6.4	2.1 (-)	2.7 (-)	2.1 (-)	2.5 (-)	2.7 (-)	3.0 (-)	2.95	1.7 (-)	2.15 (-)	2.15 (-)	2.2 (-)	2.41 (-)	2.83 (-)
M e d i a (moderadamente)	25.1	26.6 (+)	26.7 (+)	26.4 (+)	30.2 (+)	24.0 (-)	24.6 (-)	7.78	10.54 (+)	10.73 (+)	9.43 (+)	9.75 (+)	9.78 (+)	9.48 (+)
B a j a (marginamente)	31.6	33.4 (+)	35.1 (+)	43.8 (+)	39.7 (+)	40.7 (+)	40.4 (+)	40.3	38.93 (-)	40.76 (+)	48.13 (+)	48.15 (+)	44.62 (+)	45.3 (+)
No Apto	36.9	37.9 (+)	35.6 (-)	27.6 (-)	27.6 (-)	32.7 (-)	32.0 (-)	48.9	48.83 (-)	46.36 (-)	40.13 (-)	39.91 (-)	43.19 (-)	42.4 (-)

Este tipo de estudios son importantes para la elaboración de planes territoriales, al delimitar las zonas donde la producción de alimentos se dará con menores insumos y posibles medidas de adaptación y mitigación al cambio climático. Si asumimos que las zonas donde se presenta actualmente una agricultura de temporal en el mapa de INEGI, notamos que solo se utiliza el 18.5% de las tierras aptas, 13% de aptitudes medias,

10% de las bajas y el 9.7% de las No aptas. Pero en realidad la totalidad de las tierras usadas para la agricultura temporal sólo el 5% tiene una alta aptitud, 9.5% de con media, 41% con baja y el 44.5% de las no aptas.

Para el estudio caso del estado de Puebla se pudo notar un aumento de la aptitud para el maíz de temporal, al mejorarse las condiciones climáticas en la zona centro. Esta tendencia se dio en los tres escenarios de cambio climático pero con distintas magnitudes. El patrón de aumento también se da de manera similar alrededor de zonas aptas que aumentan su cobertura; de igual manera para las zonas con aptitud media y las zonas no aptas tienden a disminuir aumentado la aptitud baja. En el estado de Puebla sólo el 28% las tierras aptas son utilizadas, por lo que todavía hay un gran potencial para el cultivo del maíz de temporal. Los resultados muestran la misma tendencia encontrada para el estado de Tlaxcala en el estudio de la vulnerabilidad de la agricultura de maíz de temporal el modelo cereas-maize (Conde et al. 2000), estado aledaño a Puebla.

El modelo difuso es aplicable a distintas escalas territoriales, al punto que podría utilizarse a nivel de municipio, e inclusive a niveles regionales basándose en la percepción de los agricultores del maíz de temporal si no se llegase a contar con los datos de la región.

Este tipo de modelo difuso con base al conocimiento de expertos permite que su conocimiento sea accesible a los inexperto por lo que podría incorporarse a marcos para la toma de decisiones, debido a que su manipulación es mucho más fácil y permite relacionar variables que con otras herramientas no es posible. Contando con datos objetivos simplificará se la toma de decisiones al transparentarse con procesos objetivos y con fundamentos matemáticos.

## 5. Anexos

### 5.1 Resultados del modelo difuso tomando en cuenta solo temperatura y precipitación.

Tabla 5.1.1 Porcentajes de las distintas áreas para los distintos escenarios usando las variables de temperatura y precipitación.				
Escenario	Alta	Media	Baja	No Apta
Base	7.95%	15.12%	39.51%	37.42%
e30a1	7.87%	17.37%	36.38%	38.38%
e30a2	7.97%	17.43%	35.85%	38.74%
e30b1	7.64%	15.77%	38.32%	38.28%
e30b2	8.32%	17.81%	37.39%	36.49%
e50a1	10.11%	19.44%	34.90%	35.55%
e50a2	9.38%	18.72%	33.55%	38.35%
e50b1	9.97%	18.70%	35.77%	35.57%
e50b2	9.30%	19.02%	35.53%	36.15%
g30a1	7.32%	16.68%	44.16%	31.85%
g30a2	7.32%	16.51%	44.12%	32.05%
g30b1	7.28%	16.11%	43.23%	33.38%
g30b2	7.80%	17.49%	43.36%	31.34%
g50a1	7.94%	20.75%	45.01%	26.30%
g50a2	7.70%	18.63%	44.66%	29.01%
g50b1	7.92%	19.36%	44.34%	28.39%
g50b2	7.74%	19.18%	44.79%	28.29%
h30a1	8.08%	15.36%	41.39%	35.16%
h30a2	8.04%	15.38%	41.23%	35.34%
h30b1	7.82%	14.92%	41.05%	36.21%
h30b2	8.49%	16.18%	41.52%	33.81%
h50a1	9.12%	19.03%	40.88%	30.97%
h50a2	8.43%	17.10%	41.21%	33.25%
h50b1	8.90%	18.07%	41.08%	31.96%

Tabla 5.1.1 Porcentajes de las distintas áreas para los distintos escenarios usando las variables de temperatura y precipitación.

Escenario	Alta	Media	Baja	No Apta
h50b2	8.74%	17.55%	41.51%	32.20%

### 5.1.1 Resultados de las variables climáticas del modelo ECHAM para el horizonte 2030

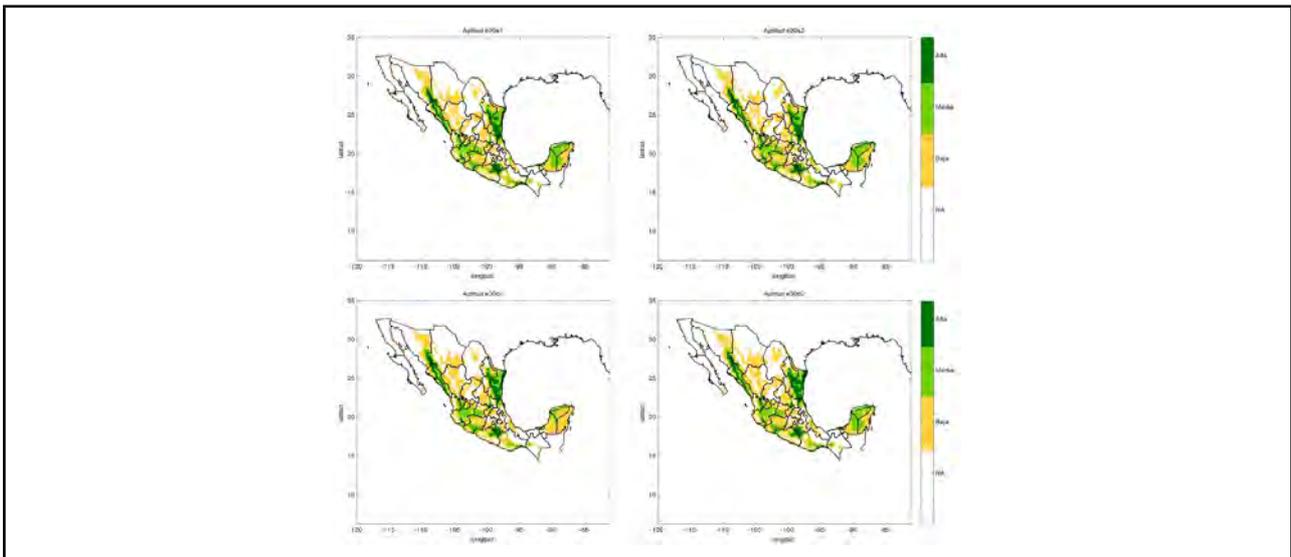


Figura 5.1.1.1. Mapas de aptitud con temperatura y precipitación para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo ECHAM para el horizonte 2030.

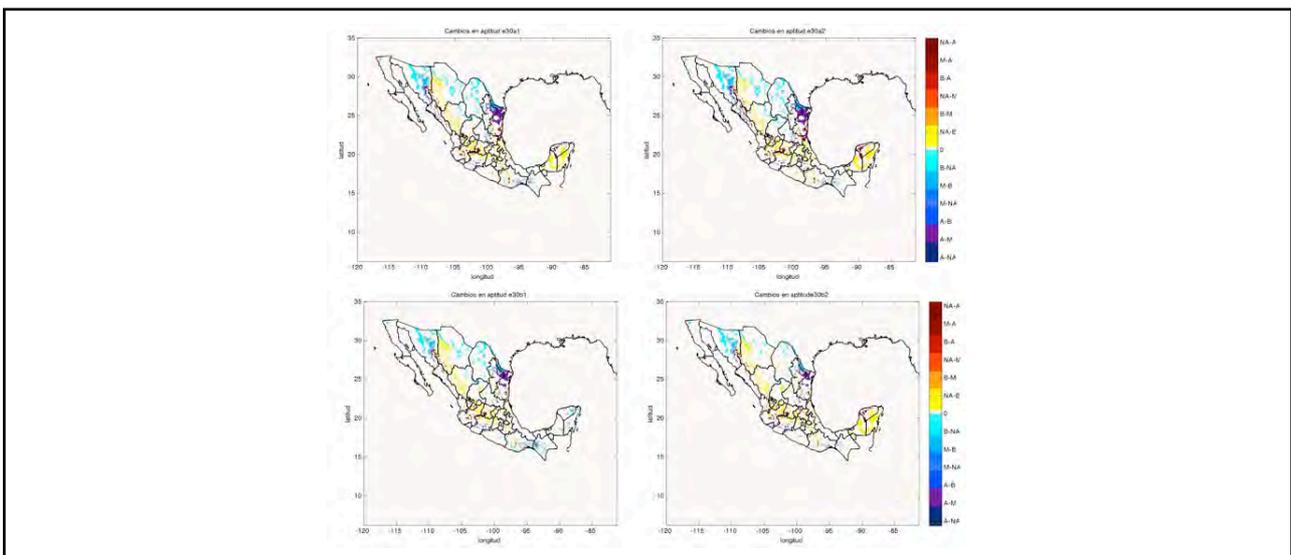


Figura 5.1.1.2 Mapas de diferencia de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo ECHAM para el horizonte 2030 con respecto al escenario base.

## 5.1.2 Resultados de las variables climáticas del modelo GDFL para el horizonte 2030

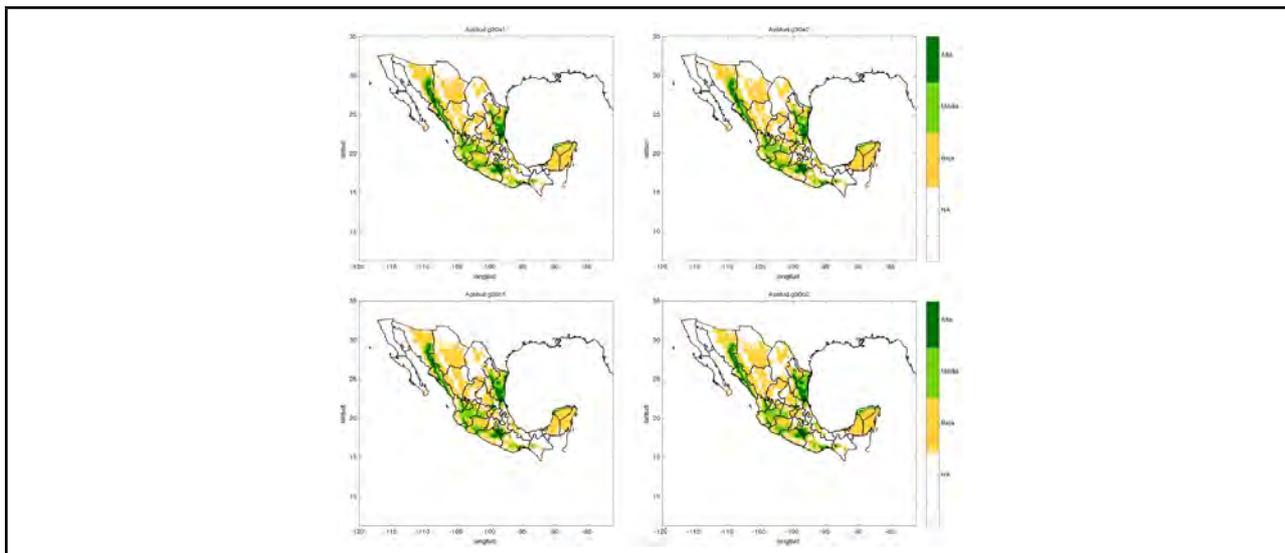


Figura 5.1.2.1 Mapas de aptitud con temperatura y precipitación para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo GDFL para el horizonte 2030.

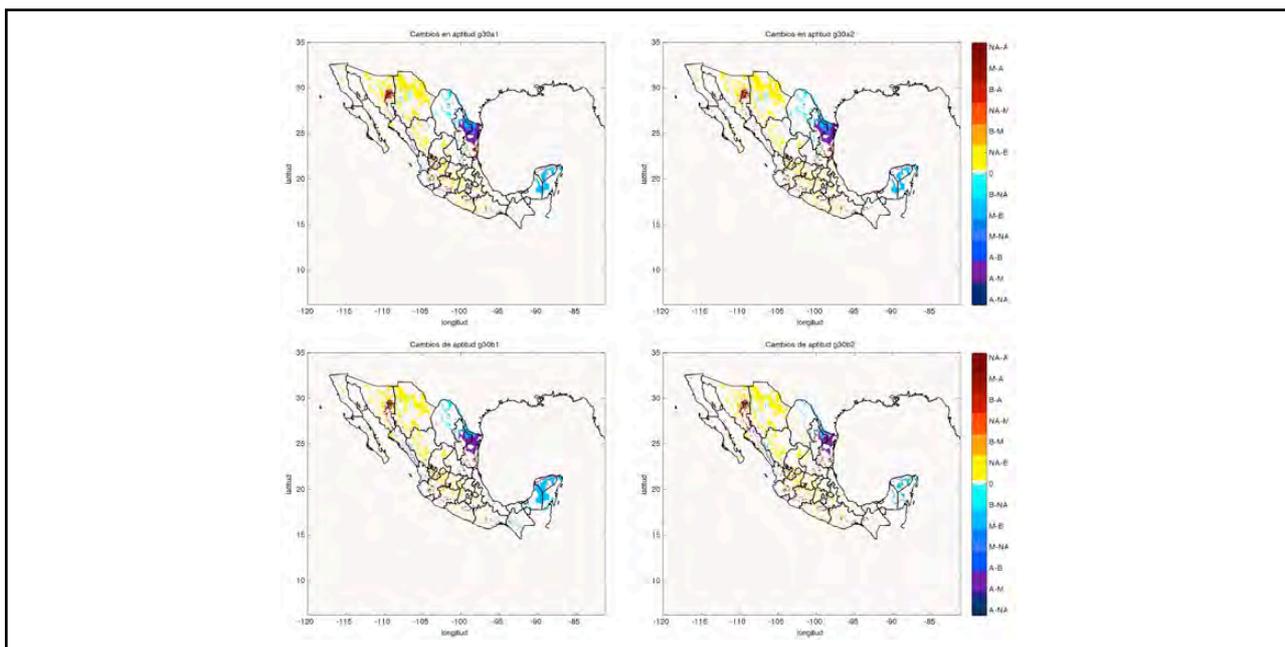


Figura 5.1.2.2 Mapas de diferencia de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo GDFL para el horizonte 2030 con respecto al escenario base.

### 5.1.3 Resultados de las variables climáticas del modelo HADLEY para el horizonte 2030

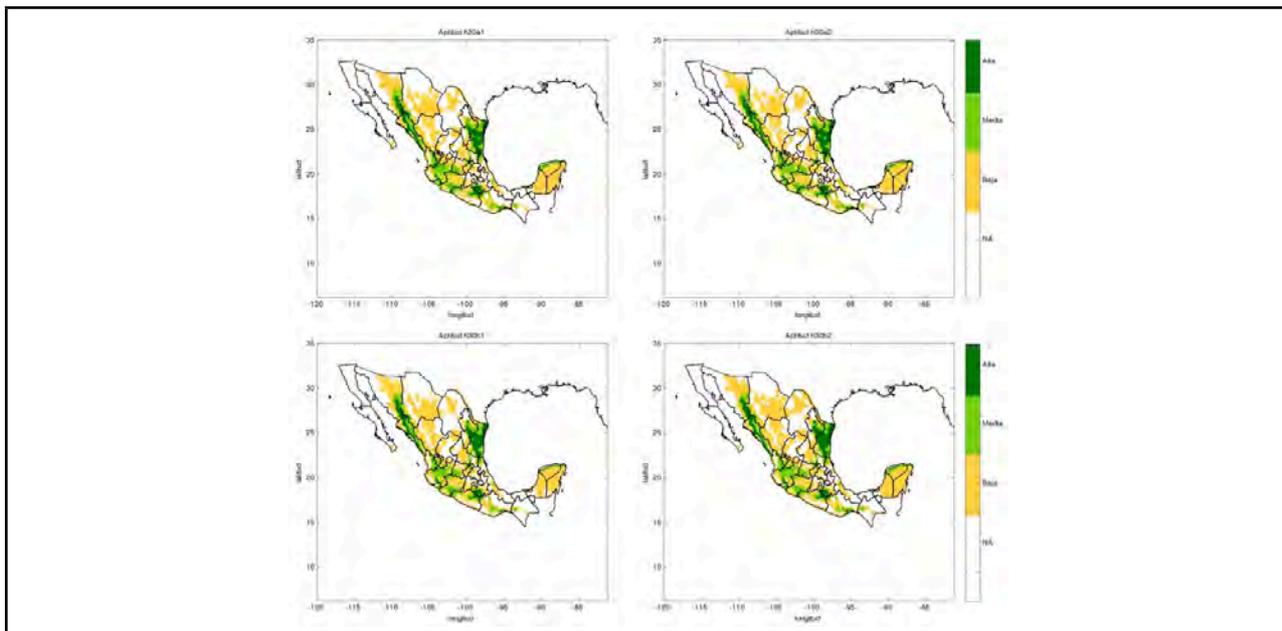


Figura 5.1.3.1 Mapas de aptitud con temperatura y precipitación para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo HADLEY para el horizonte 2030.

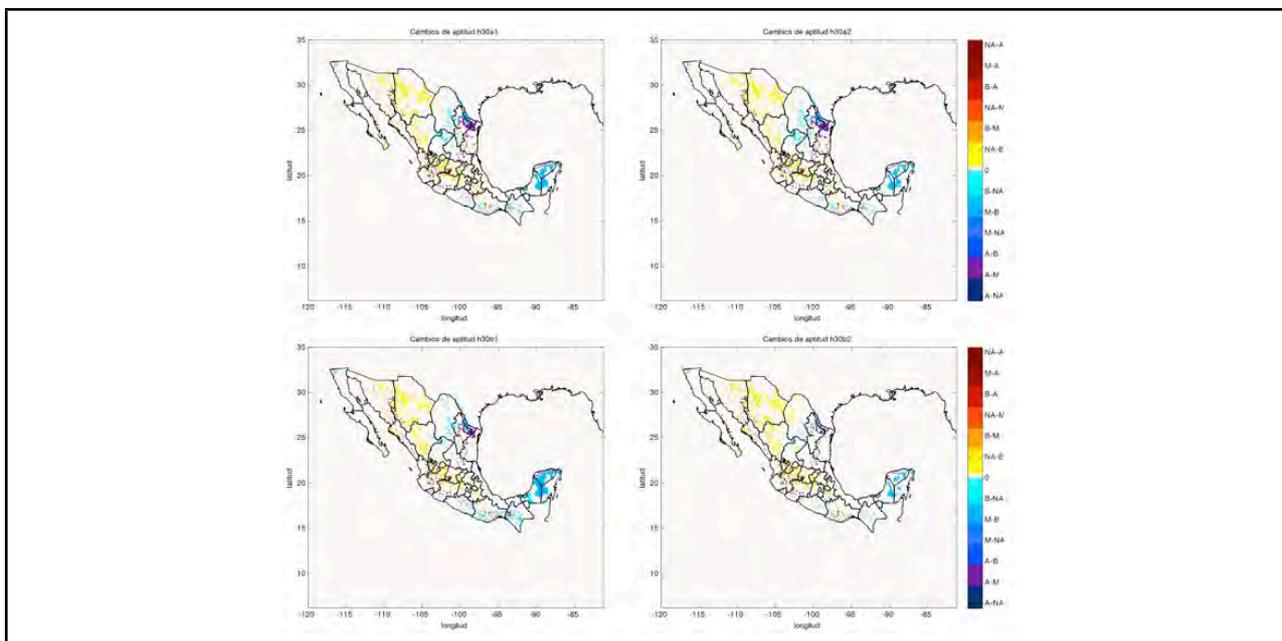


Figura 5.1.3.2 Mapas de diferencia de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo HADLEY para el horizonte 2030 con respecto al escenario base.

## 5.2 Resultados del modelo difuso con cuatro variables

Tabla 5.2.1 Porcentajes de las distintas áreas para los distintos escenarios.				
Escenario	Alta	Media	Baja	No Apta
Base	2.95%	7.78%	40.34%	48.93%
e30a1	1.82%	9.65%	39.15%	49.38%
e30a2	1.77%	9.68%	38.78%	49.77%
e30b1	1.99%	8.83%	39.72%	49.46%
e30b2	2.33%	9.66%	40.61%	47.41%
e50a1	2.15%	11.36%	40.97%	45.52%
e50a2	1.70%	10.54%	38.93%	48.83%
e50b1	2.36%	10.74%	40.96%	45.94%
e50b2	2.15%	10.73%	40.76%	46.36%
g30a1	1.94%	9.02%	45.70%	43.34%
g30a2	1.89%	8.94%	45.55%	43.62%
g30b1	2.00%	9.01%	44.02%	44.97%
g30b2	2.21%	9.38%	45.89%	42.52%
g50a1	2.26%	10.08%	49.53%	38.13%
g50a2	2.15%	9.43%	48.13%	40.30%
g50b1	2.22%	9.84%	48.00%	39.95%
g50b2	2.20%	9.75%	48.15%	39.91%
h30a1	2.28%	9.13%	42.54%	46.05%
h30a2	2.21%	9.14%	42.34%	46.31%
h30b1	2.40%	8.79%	41.34%	47.47%
h30b2	2.72%	8.89%	43.78%	44.61%
h50a1	2.99%	9.88%	46.54%	40.60%
h50a2	2.41%	9.78%	44.62%	43.19%
h50b1	2.92%	9.45%	45.51%	42.13%
h50b2	2.83%	9.48%	45.30%	42.40%

## 5.2.1 Resultados del modelo ECHAM para el horizonte 2030

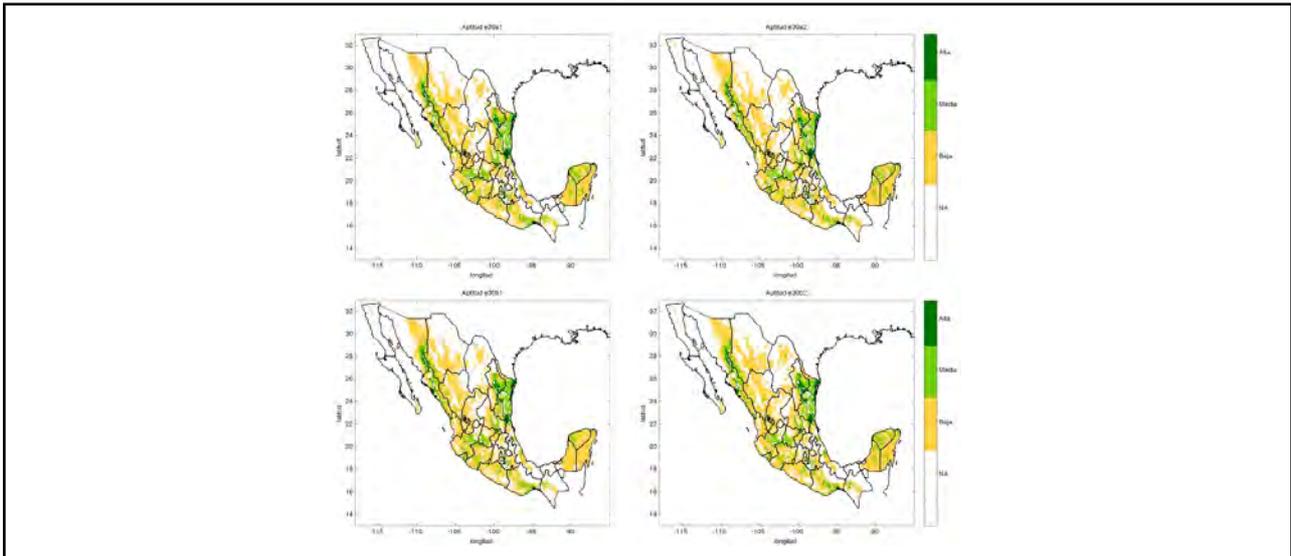


Figura 5.2.1.1 Mapas de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo ECHAM para el horizonte 2030.

Tabla 5.2.1.1 Porcentaje de cambio de las áreas con distintas aptitudes con respecto al mapa base para los escenarios ECHAM del 2030.

Escenario	Alta	Media	Baja	No Apta
E30a1	-38.22%	24.00%	-2.96%	0.93%
E30a2	-40.11%	24.37%	-3.88%	1.73%
E30b1	-32.47%	13.40%	-1.55%	1.10%
E30b2	-21.10%	24.10%	0.66%	-3.10%

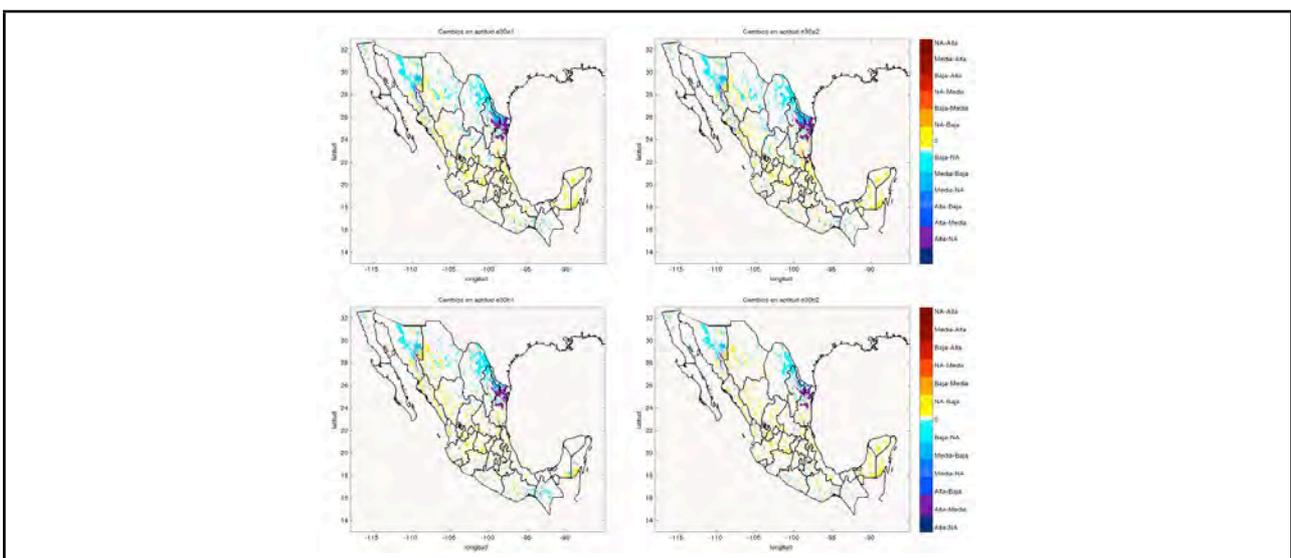


Figura 5.2.1.2 Mapas de diferencia de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo ECHAM para el horizonte 2030 con respecto al escenario base.

## 5.2.2 Resultados del modelo GDFL para el horizonte 203

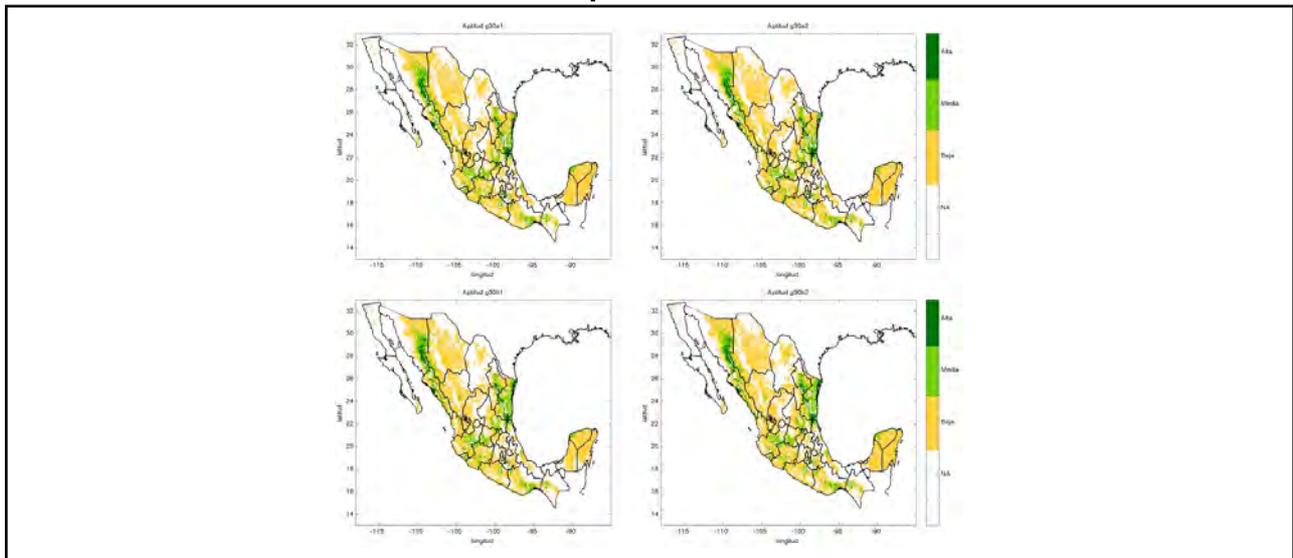


Figura 5.2.2.1 Mapas de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo GDFL para el horizonte 2030.

Tabla 5.2.2.1 Porcentaje de cambio de las áreas con distintas aptitudes con respecto al mapa base para los escenarios GDFL del 2030.

Escenario	Alta	Media	Baja	No Apta
G30a1	-34.26%	15.92%	13.28%	-11.42%
G30a2	-35.96%	14.91%	12.90%	-10.84%
G30b1	-32.28%	15.70%	9.12%	-8.08%
G30b2	-24.89%	20.45%	13.75%	-13.09%

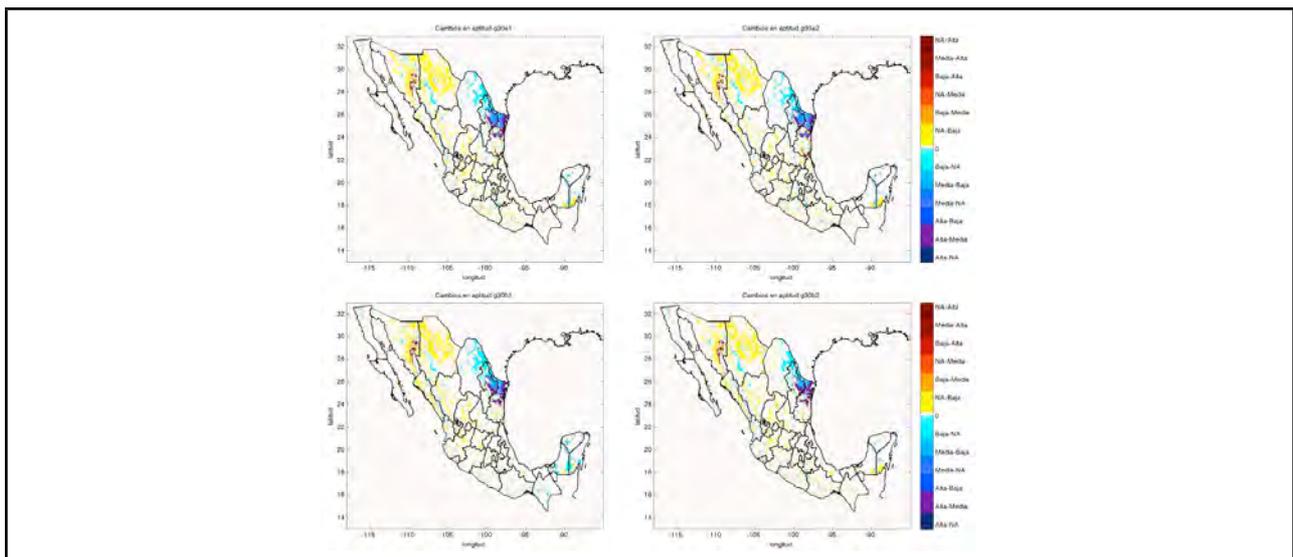


Figura 5.2.2.2 Mapas de diferencia de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo GDFL para el horizonte 2030 con respecto al escenario base.

### 5.2.3 Resultados del modelo HADLEY para el horizonte 2030

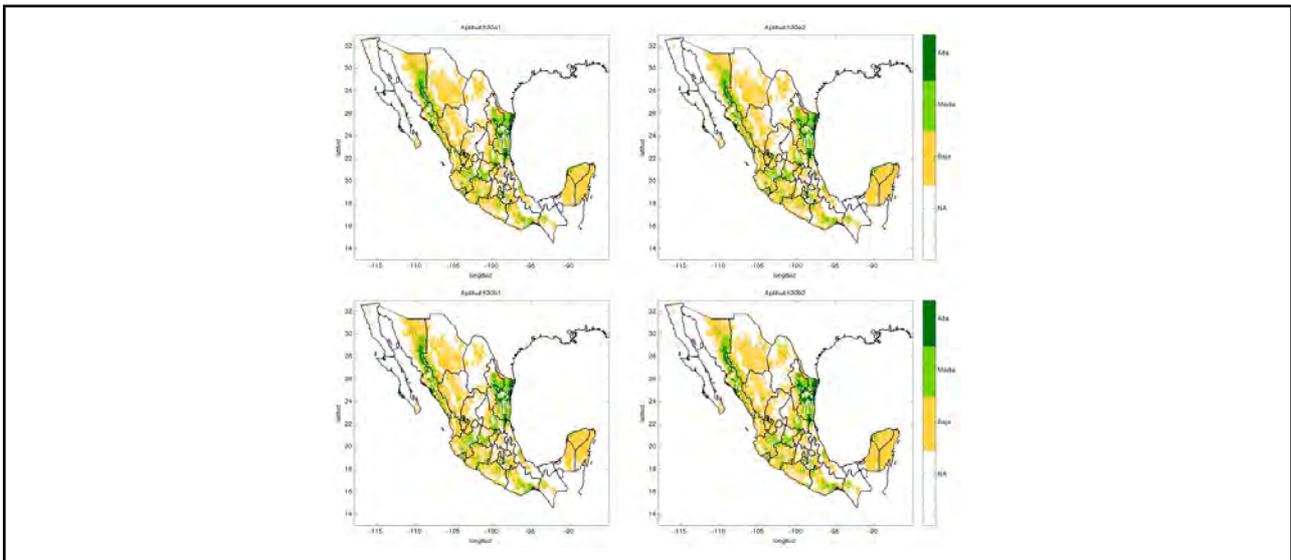


Figura 5.2.3.1 Mapas de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo HADLEY para el horizonte 2030.

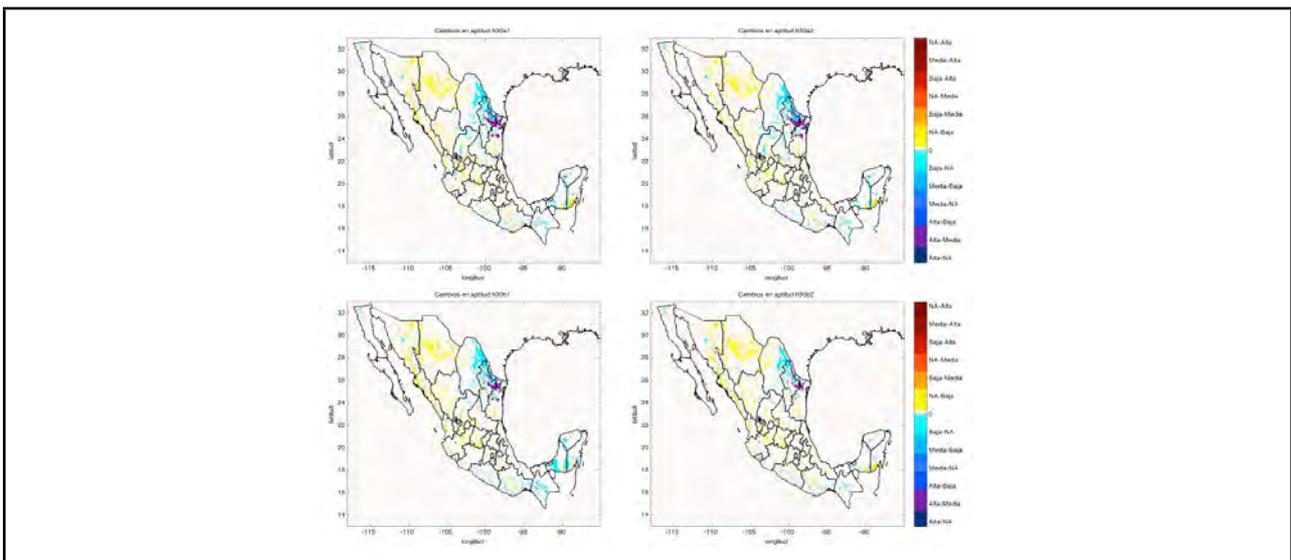


Figura 5.2.3.2 Mapas de diferencia de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo HADLEY para el horizonte 2030 con respecto al escenario base.

Tabla 5.2.3.1 Porcentaje de cambio de las áreas con distintas aptitudes con respecto al mapa base para los escenarios HADLEY del 2030.

Escenario	Alta	Media	Baja	No Apta
H30a1	-22.72%	17.31%	5.44%	-5.87%
H30a2	-25.05%	17.47%	4.95%	-5.35%
H30b1	-18.58%	12.95%	2.48%	-2.98%
H30b2	-7.76%	14.25%	8.51%	-8.82%

### 5.3 Estudio caso: Puebla

Tabla 5.3.1 Porcentajes de las distintas áreas para los distintos escenarios para el estado de Puebla.				
Escenario	Alta	Media	Baja	No Apta
Base	3.21%	3.05%	55.08%	38.66%
e30a1	3.44%	5.85%	55.72%	34.99%
e30a2	3.42%	5.79%	55.80%	34.99%
e30b1	3.42%	5.54%	54.87%	36.17%
e30b2	3.43%	5.79%	55.28%	35.49%
e50a1	3.62%	7.01%	56.61%	32.76%
e50a2	3.61%	7.04%	56.69%	32.65%
e50b1	3.51%	6.35%	56.25%	33.89%
e50b2	3.56%	6.64%	56.14%	33.67%
g30a1	3.35%	5.19%	54.87%	36.59%
g30a2	3.34%	5.05%	55.07%	36.54%
g30b1	3.33%	4.70%	54.50%	37.46%
g30b2	3.35%	5.24%	54.65%	36.76%
g50a1	3.38%	5.99%	55.77%	34.86%
g50a2	3.37%	5.72%	55.86%	35.06%
g50b1	3.33%	4.70%	54.50%	37.46%
g50b2	3.45%	5.75%	55.08%	35.72%
h30a1	3.42%	5.68%	54.81%	36.10%
h30a2	3.42%	5.60%	54.93%	36.05%
h30b1	3.30%	5.47%	54.10%	37.12%
h30b2	3.42%	5.63%	54.58%	36.38%
h50a1	3.62%	7.01%	55.54%	33.84%
h50a2	3.57%	6.94%	55.57%	33.92%
h50b1	3.49%	6.26%	55.15%	35.11%
h50b2	3.51%	6.59%	55.04%	34.86%

### 5.3.1 Resultados del modelo ECHAM para el horizonte 2030 para Puebla

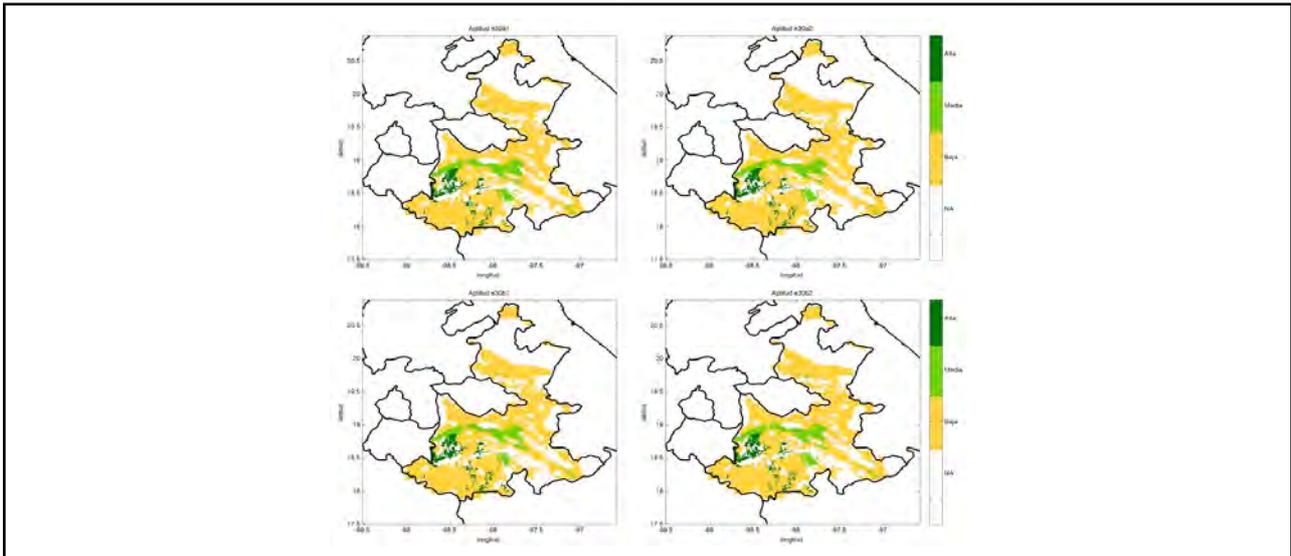


Figura 5.3.1.1 Mapas de aptitud de puebla para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo ECHAM para el horizonte 2030.

Tabla 5.3.1.1 Porcentaje de cambio de las áreas con distintas aptitudes con respecto al mapa base de Puebla para los escenarios ECHAM del 2030.

Escenario	Alta %	Media %	Baja %	No Apta %
E30a1	7.01%	91.91%	1.16%	-1.39%
E30a2	6.57%	90.06%	1.30%	-1.39%
E30b1	6.43%	81.97%	-0.40%	-0.94%
E30b2	6.72%	90.14%	0.36%	-1.20%

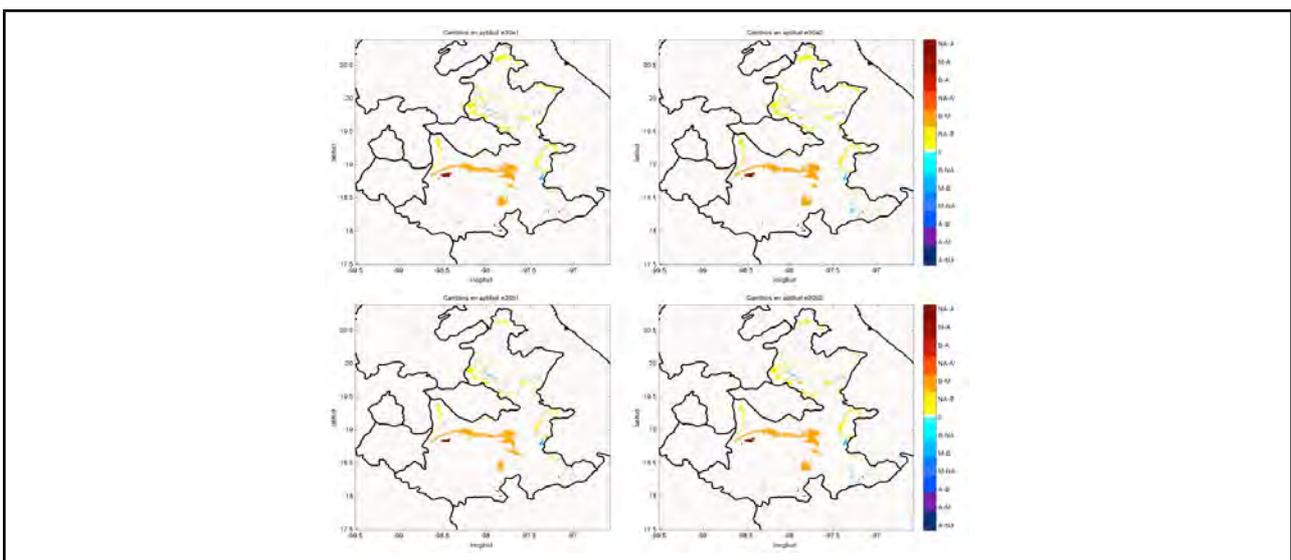


Figura 5.3.1.2 Mapas de diferencia de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo ECHAM para el horizonte 2030 con respecto al escenario base.

### 5.3.2 Resultados del modelo GDFL para el horizonte 2030 para Puebla

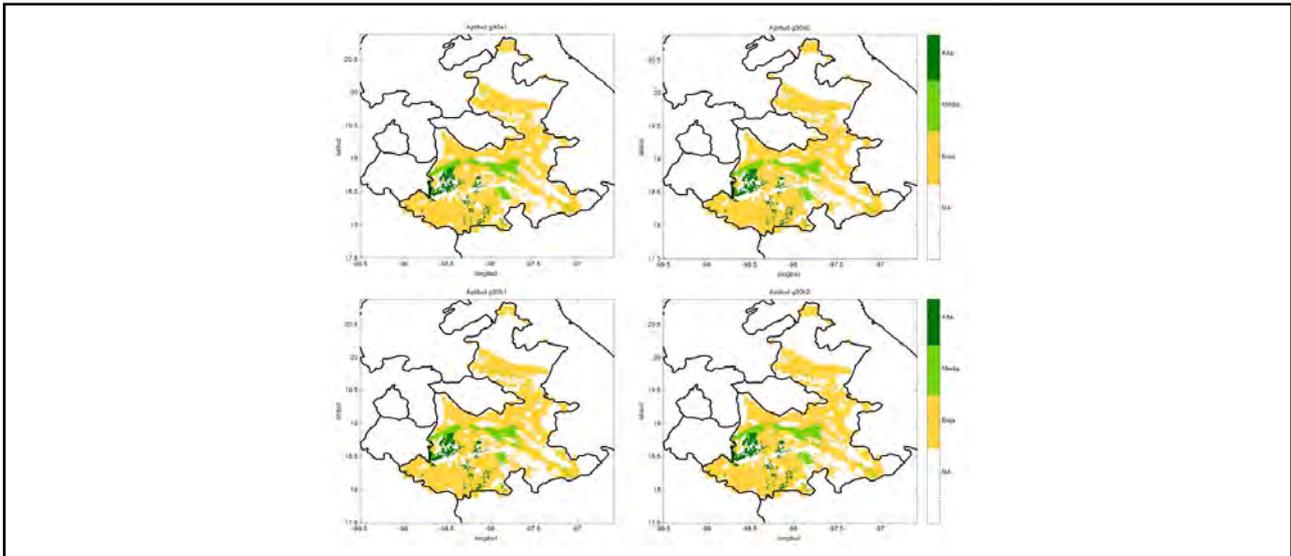


Figura 5.3.2.1 Mapas de aptitud con temperatura y precipitación para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo GDFL para el horizonte 2030.

Tabla 5.3.2.1 Porcentaje de cambio de las áreas con distintas aptitudes con respecto al mapa base de Puebla para los escenarios GDFL del 2030.

Escenario	Alta %	Media %	Baja %	No Apta %
G30a1	4.31%	70.42%	-0.40%	-0.78%
G30a2	4.02%	65.72%	-0.03%	-0.80%
G30b1	3.73%	54.39%	-1.06%	-0.45%
G30b2	4.38%	71.96%	-0.79%	-0.72%

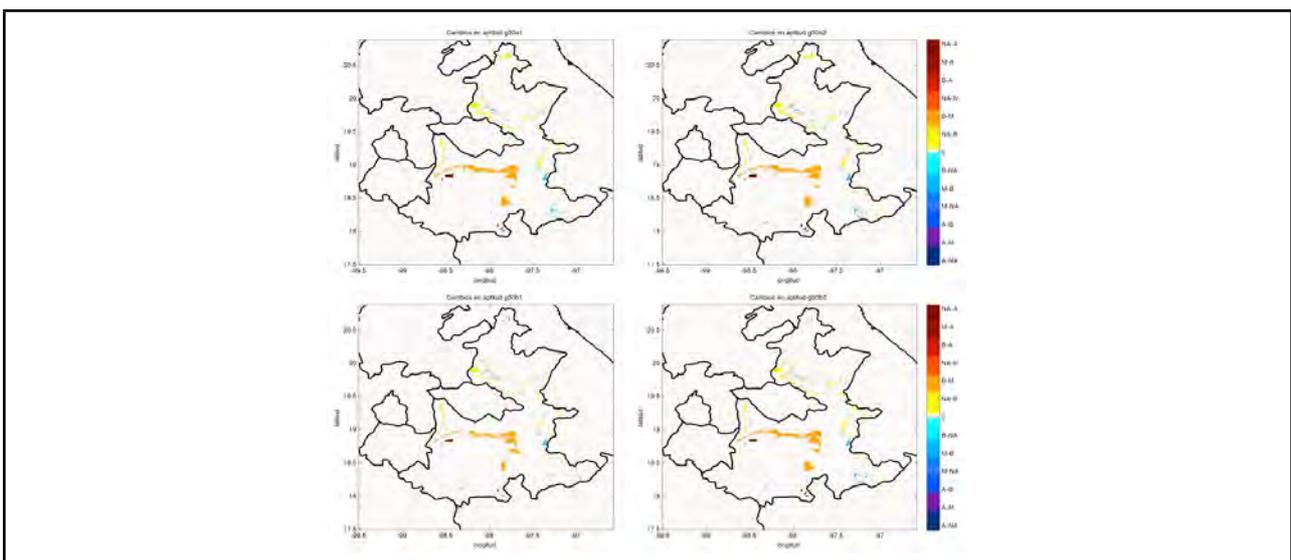


Figura 5.3.2.2 Mapas de diferencia de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo GDFL para el horizonte 2030 con respecto al escenario base.

### 5.3.3 Resultados del modelo HADLEY para el horizonte 2030 para Puebla

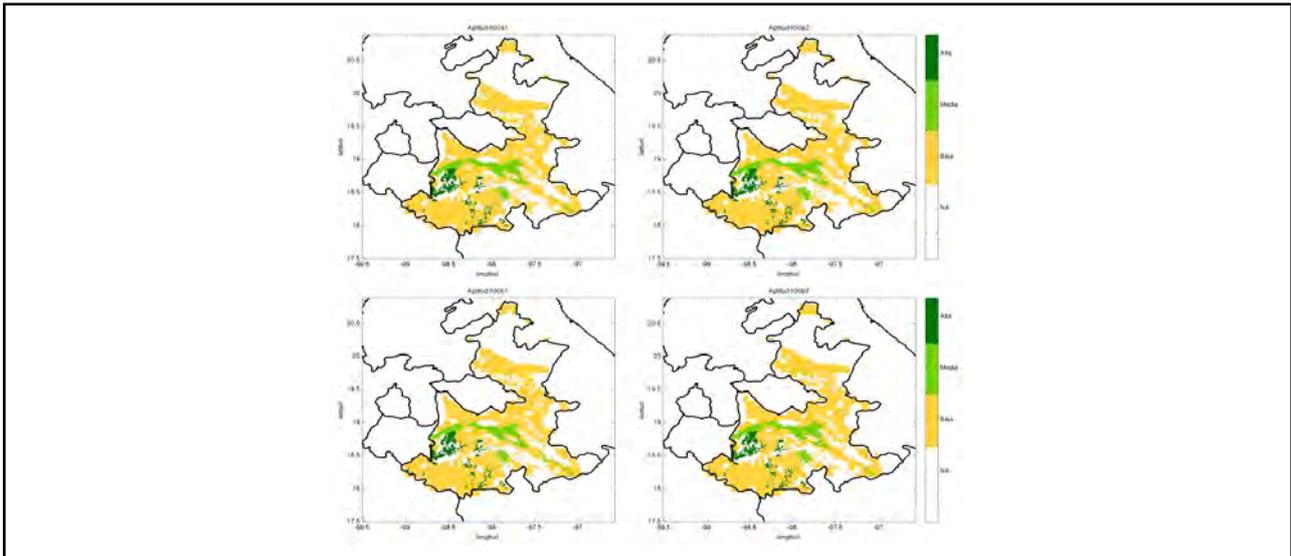


Figura 5.3.3.1 Mapas de aptitud con temperatura y precipitación para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo HADLEY para el horizonte 2030.

Tabla 5.3.3.1 Porcentaje de cambio de las áreas con distintas aptitudes con respecto al mapa base de Puebla para los escenarios HADLEY del 2030.

Escenario	Alta %	Media %	Baja %	No Apta %
H30a1	6.36%	86.44%	-0.51%	-0.97%
H30a2	6.28%	83.98%	-0.28%	-0.99%
H30b1	2.85%	79.66%	-1.79%	-0.58%
H30b2	6.28%	84.82%	-0.92%	-0.86%

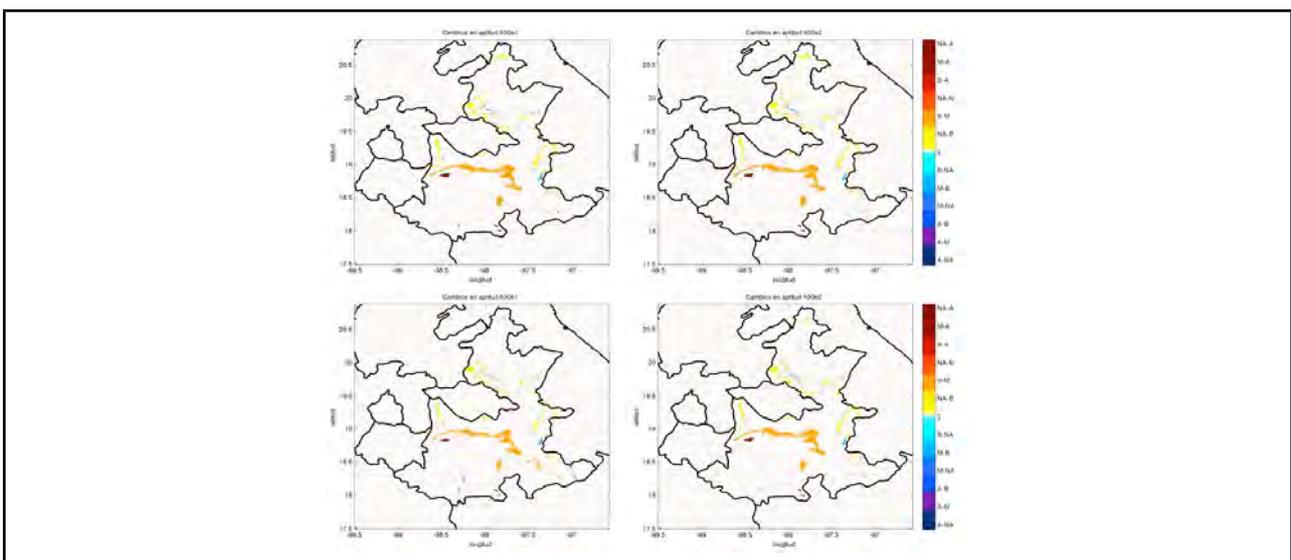


Figura 5.3.3.2 Mapas de diferencia de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo HADLEY para el horizonte 2030 con respecto al escenario base.

## 5.4 Aplicaciones futuras

Con otras herramientas de la lógica difusa se puede determinar la relación que existe entre la aptitud natural de una área con otras variables relevantes. Como los datos que se pueden obtener son a nivel de municipio se pierde el detalle que pudimos obtener con las mallas de 1x1km, al tener que transferir el resultado del modelo a nivel de municipio. Al igual que los datos presentados muestran incongruencias, si observamos el mapa de aptitud con uso de suelo en la figura 5.4.1 no todos los municipios tienen agricultura de temporal, pero los datos obtenidos de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) ver tabla 5.4.1, presentan que solo tres municipios no cultivan maíz de temporal, en cambio el mapa de uso de suelos del INEGI, presenta mayor número de municipios sin agricultura de temporal (figura 5.4.6).

Para guardar la constancia en los datos de uso de suelo y el promedio de aptitud por municipio se calculó el promedio de la aptitud de las áreas dentro de los municipios donde presentan uso de suelo de agricultura de temporal (figura 5.4.2).

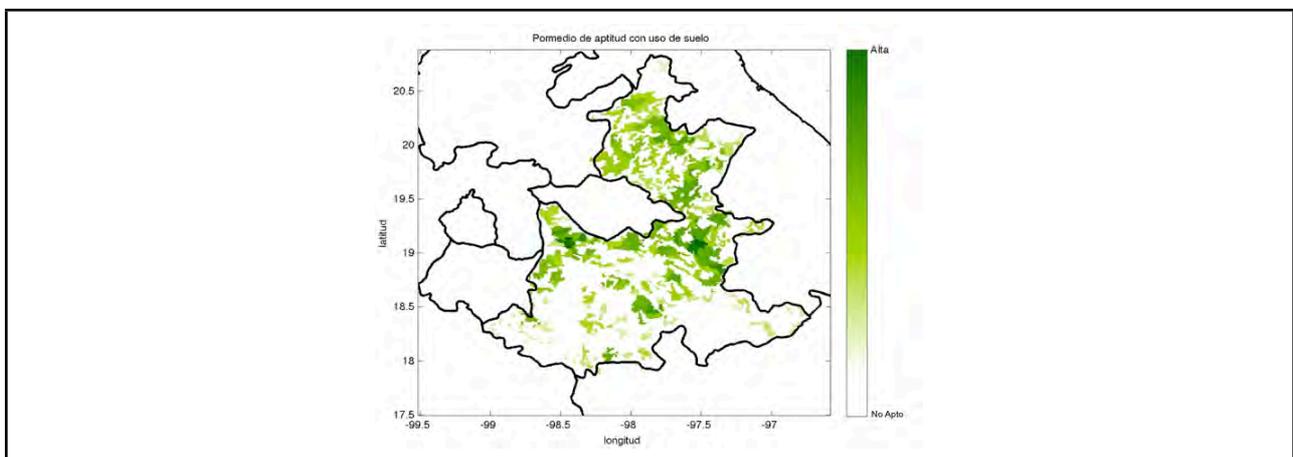


Figura 5.4.1 Mapa de Puebla aptitud promedio en las áreas de uso de suelo de agricultura de temporal por municipio y con el uso de suelo de agricultura de temporal

Posteriormente se extrajeron los valores de la aptitud promedio en las áreas de uso de suelo por municipio a los puntos donde se tiene el uso de suelo de agricultura de temporal. Lo mismo se hizo para los valores de rendimiento (producción [toneladas]/área cosechada [hectáreas]), y el porcentaje de áreas siniestrada por municipio (figura 5.4.2).

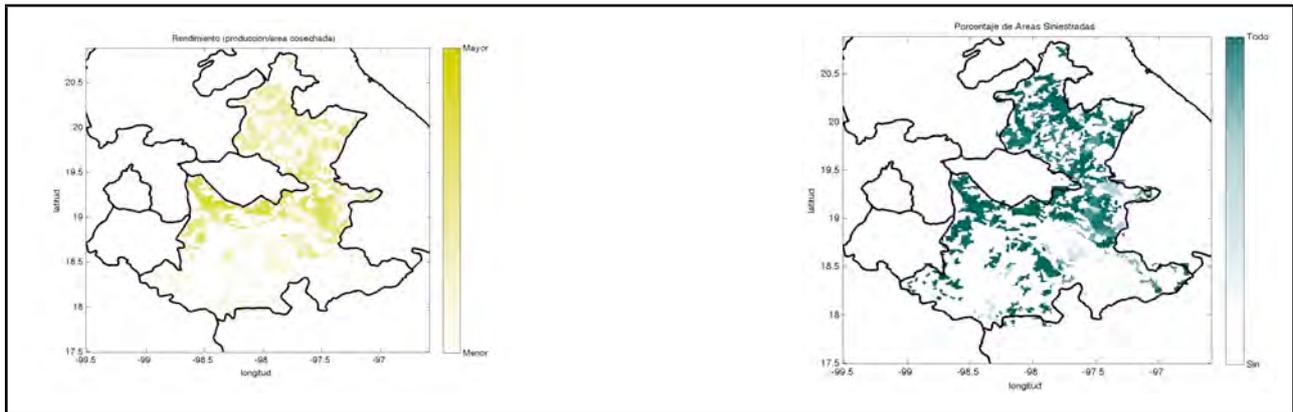


Figura 5.4.2 Mapa izquierda es de rendimiento por hectárea con el uso de suelo de agricultura de temporal de Puebla. Mapa derecho es el porcentaje de áreas siniestradas por municipio con el uso de suelo de agricultura de temporal de Puebla.

Para determinar la relación entre la aptitud del maíz temporal, el rendimiento y el porcentaje de áreas siniestradas, se usó el generador de un sistema difuso usando un algoritmo de agrupamiento substractivo (Chiu 1994). Este algoritmo permite estimar el número de agrupamientos y los centros de estos cuando no se tiene una idea clara de cuántos deben ser. Para formar los agrupamientos se establecen los centros a través del método de agrupamiento substractivo (Dubois et al. 1980), una vez que se tiene el centro se puede determinar el radio de influencia. Cada dato del conjunto se mide el potencial que este sea el centro del conjunto basado en la densidad de los datos que lo rodean. Para este caso se calcularon dos centros, y así reducir la complejidad de los conjuntos para un análisis de la relación entre las variables.

Una vez obtenidos los agrupamientos, se utiliza para generar las reglas y las funciones de membresía de antecedente, con ello se calcula con uso de la estimación de mínimos cuadrados las ecuaciones de cada regla consecuente. En este caso se tienen dos entradas y una salida. Usando la función `genfis2` (MATLAB 2009) introducimos 75% de los datos para entrenar y generar un sistema de inferencia difuso tipo Sugeno (Sugeno 1977) que modelara el comportamiento de los datos.

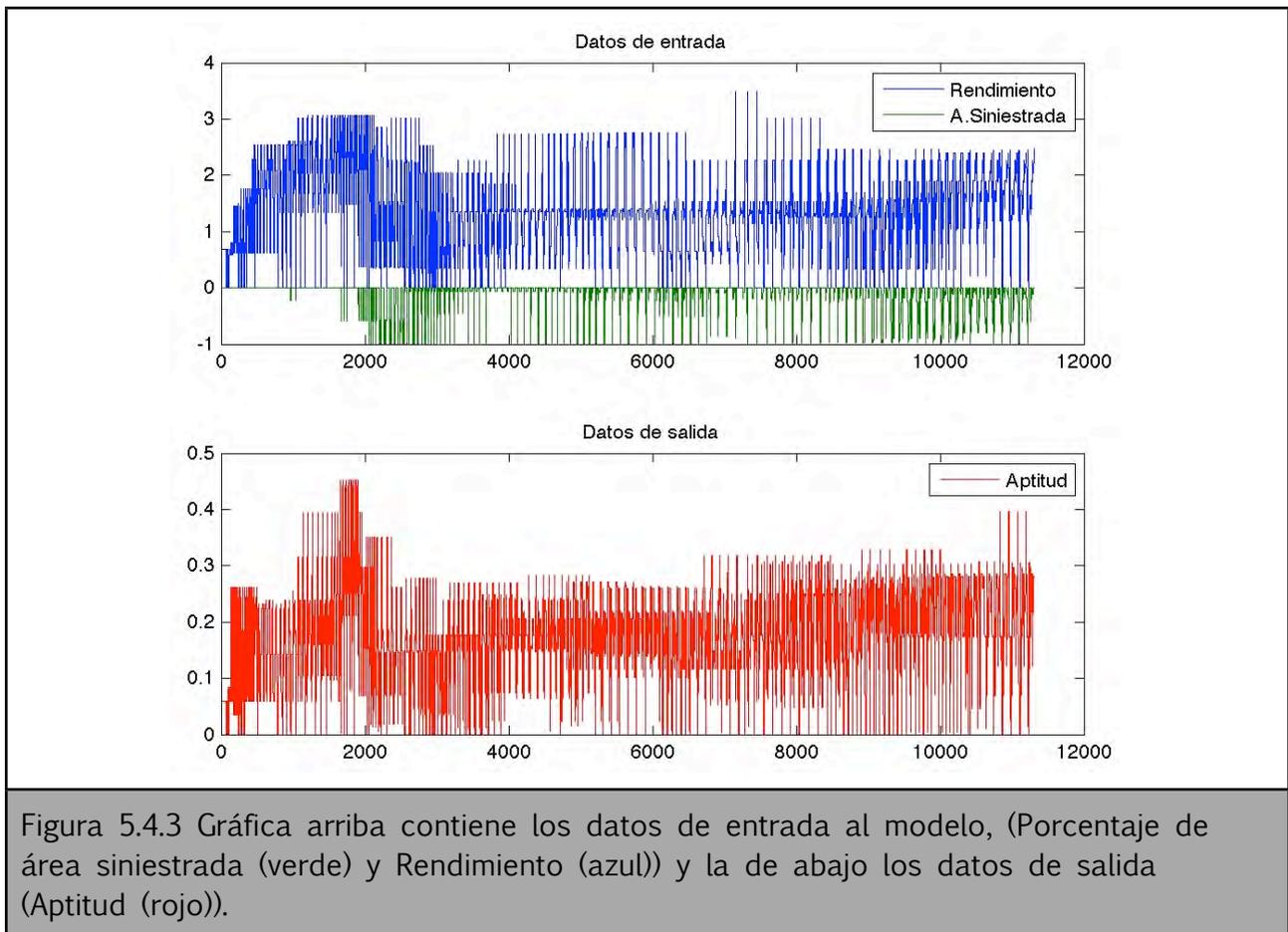


Figura 5.4.3 Gráfica arriba contiene los datos de entrada al modelo, (Porcentaje de área siniestrada (verde) y Rendimiento (azul)) y la de abajo los datos de salida (Aptitud (rojo)).

Una vez introducidos el 75% de los datos (figura 3.4.4.3), se obtiene un sistema de inferencia difuso tipo Sugeno. Se verifica el modelo usando los datos que se usaron para entrenar el modelo, resultando los valores de la salida de aptitud. El siguiente paso es obtener la raíz media cuadrática del error (valor eficaz), que en este caso resulto: 0.0676.

Una vez obtenido ese valor se valida el modelo utilizando el 25% de los datos restantes, una vez más se evalúa el modelo con los datos restantes y se obtienen los valores que da el modelo y se saca la raíz media cuadrática del error, que resulto: 0.0904. Ambos valores son muy pequeños denotando que el modelo si tiene un error pero es muy próximo a cero. Pero a pesar de ello el modelo todavía no es perfecto, (figura 5.4.4) ya que los datos generados por el modelo con el 25% restante llegan a tener diferencias significativas con los datos originales.

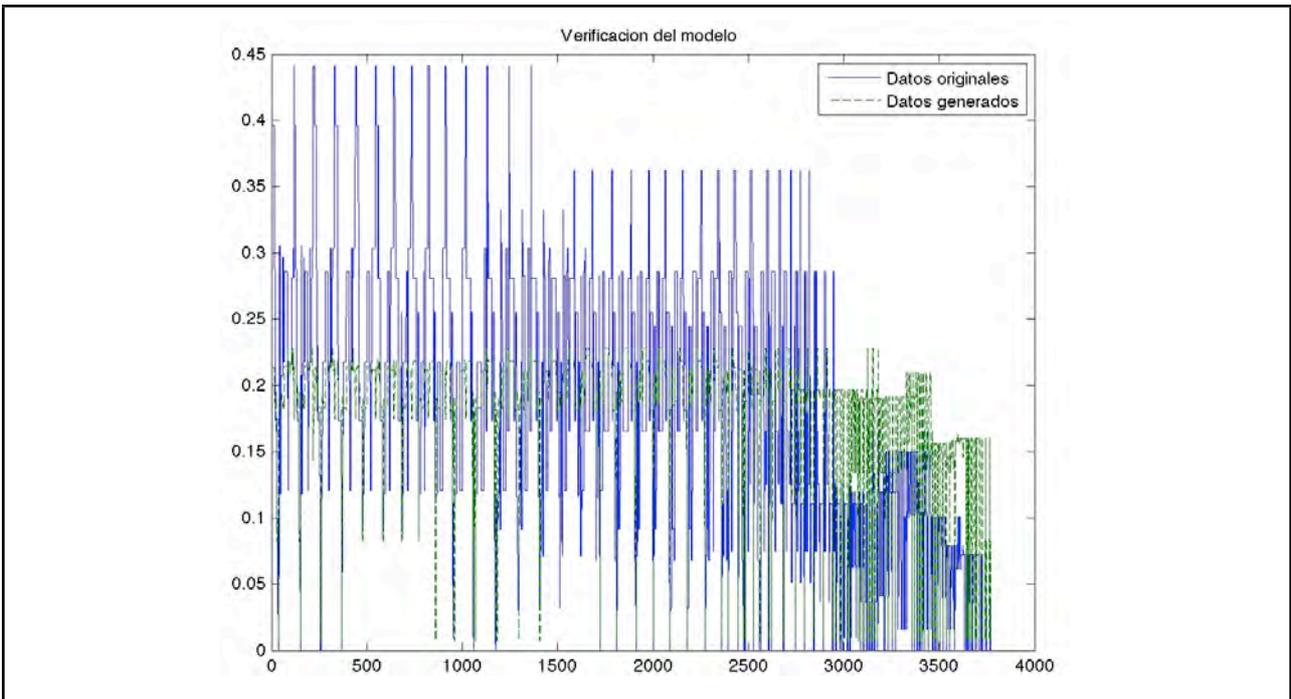


Figura 5.4.4 El 25% de los datos de salida originales en azul, contra los datos generados por el modelo en verde con el 25% de los datos de entrada.

El modelo difuso arroja una superficie de las reglas generadas por las variables de entrada y su relación con la salida, en este caso la aptitud, ver figura 5.4.5. Donde presenta que hay una peor aptitud en la zonas donde se pierde toda la cosecha y no se siembra. La superficie es irregular pero muestra una tendencia que entre menos pérdidas y mayor proporción de área sembrada mejor aptitud se tiene.

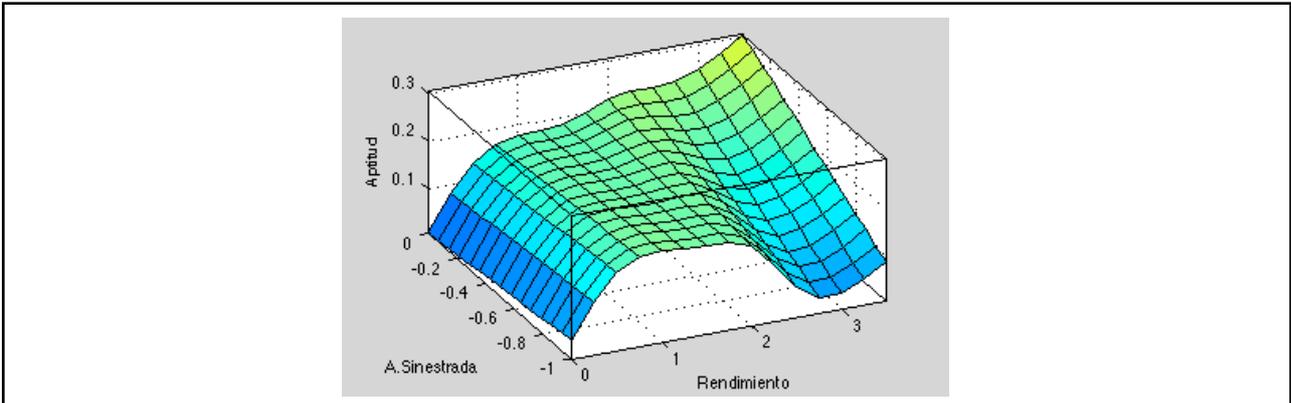
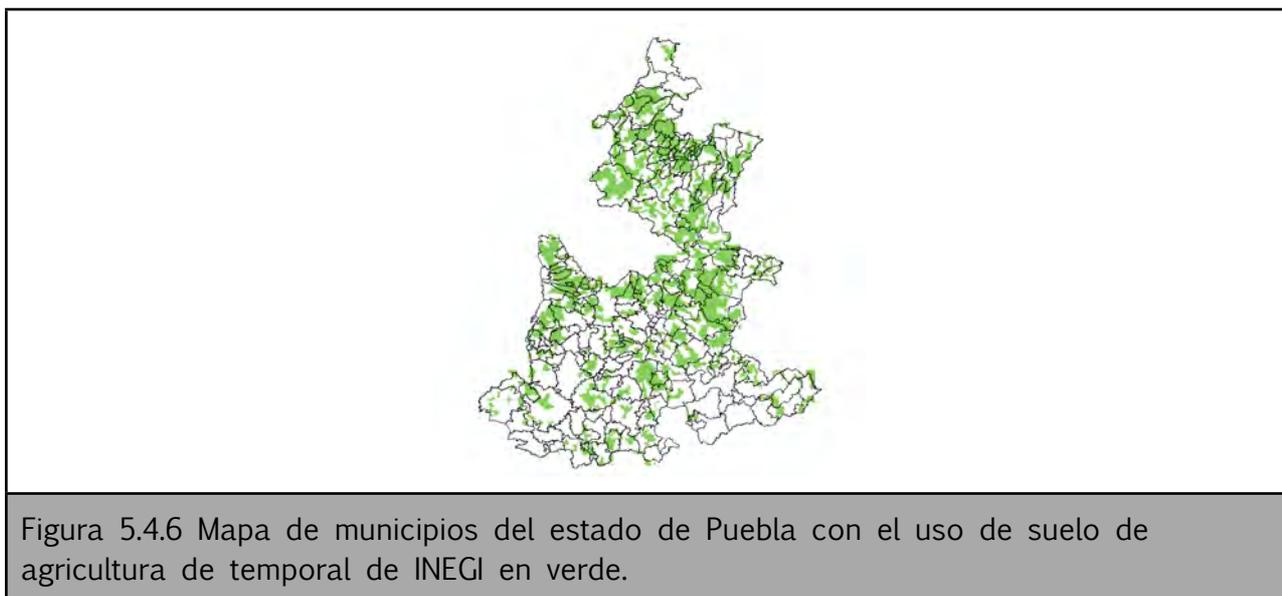


Figura 5.4.5 Superficie generada por las reglas entre la rendimiento y el porcentaje de área siniestrada.

Este modelo es preliminar, al mostrarse lo que se puede hacer más adelante para tener una mejor idea que representa que cambie la aptitud del cultivo como en este caso es el de maíz temporal. Para mejorarse los datos deben de tener una mejor calidad ya que como mencione anteriormente no todos los municipios según los datos del mapa de uso de suelo (INEGI 2005) presentan agricultura de temporal y según los datos de la SIAP de SAGARPA (SAGARPA 2000-2008) solo tres municipios no (figura 5.4.6). También se presenta el factor humano en los datos, ya que un agricultor puede declarar áreas

siniestradas para obtener dinero de seguros, o simplemente no plantar el área que declaro.



## Conclusiones

Al ser Puebla es un estado de suma importancia en la producción de maíz, se empezó un análisis de mayor profundidad que relación tenía la aptitud con otras variables, las otras variables fueron el rendimiento, y el porcentaje de área siniestrada. Se usó la metodología del análisis de agrupamiento substractivo para establecer las distintas relaciones que hay entre la aptitud y las otras variables. Este modelo preliminar determina que entre menos rendimientos y mayor pérdida menor es la aptitud. Al igual que si se tiene mayores rendimientos y menores pérdidas, mayor es la aptitud (ver figura 5.4.5). Los datos de la SIAP de SAGARPA presentan inconvenientes porque están presentados a nivel de municipio y dentro del mismo municipio hay varias aptitudes. Además en los datos de la SAGARPA, en términos de la pérdida de área cosechada, no hay distinciones si la pérdida fue por contingencia climática, pérdidas por plagas, o simplemente que el agricultor no sembró el total del área que había declarado, o que no cosecho toda el área de sembrado (que puede ocurrir cuando el precio del maíz cae y ya no le conviene cosecharlo). Los datos con los que se cuenta son del 2000 al 2008, más atrás la cantidad de municipios disminuye y después solo se cuenta con los distritos de desarrollo rural (DDR), de los cuales no se tiene una lista clara de los municipios que pertenecen a cada uno, además que algunos pertenecen a varios, y tampoco cuenta con un mapa de ellos. También refleja que la agricultura como cualquier sistema humano es complejo, y se necesita de un mayor número de variables para poder establecer relaciones más claras. Pero los resultados preliminares permiten establecer relaciones entre estas variables.

Al tener datos objetivos se simplifica la toma de decisiones al transparentarse con procesos objetivos y con fundamentos matemáticos, ya que los resultados podrán ser significativos a pesar que los datos sean insuficientes, como en el caso estudio de Puebla.

Tabla 5.4.1 Información de la SAGARPA del cultivo de maíz por municipio del estado de Puebla, para los años 2000-2008.

Número de municipio	Nombre	Promedio de área sembrada	Promedio de área cosechada	Rendimiento [Ton/Ha]	Porcentaje del área siniestrada
217	ZOQUITLAN	2095	1678.25	0.65	-0.20
216	ZOQUIAPAN	1007.5	876.96	1.72	-0.13
215	ZONGOZOTLA	1212.5	1112.5	1.71	-0.08
214	ZINACATEPEC	0	0	0	0.00
213	ZIHUATEUTLA	1216.17	1147.83	1.65	-0.06
212	ZAUTLA	2315	1317.49	1.43	-0.43
211	ZARAGOZA	2520	1635.45	1.69	-0.35
210	ZAPOTITLAN DE MENDEZ	1312.5	1126.91	1.7	-0.14
209	ZAPOTITLAN	1903.33	1158.17	0.2	-0.39
208	ZACATLAN	10288.5	8719.04	1.31	-0.15
207	ZACAPOAXTLA	3333.33	2833.65	1.58	-0.15
206	ZACAPALA	2252.5	1724.17	0.46	-0.23
205	YEHUALTEPEC	2761.17	543.17	0.23	-0.80
204	YAONAHUAC	1244.17	1120.3	1.58	-0.10
203	XOCHITLAN TODOS SANTOS	1185	673.83	0.26	-0.43
202	XOCHITLAN DE VICENTE SUAREZ	1310	1296.7	1.67	-0.01
201	XOCHILTEPEC	816.17	536.17	0.48	-0.34
200	XOCHIAPULCO	1395	1332.95	1.58	-0.04
199	XIUTETELCO	2294.17	1926.8	1.51	-0.16
198	XICOTLAN	712	321.67	0.33	-0.55
197	XICOTEPEC	1318	1258.04	1.36	-0.05
196	XAYACATLAN DE BRAVO	225.67	153.82	0.4	-0.32
195	VICENTE GUERRERO	5130	3694.21	0.47	-0.28
194	VENUSTIANO CARRANZA	2383	2336.92	1.27	-0.02
193	TZICATLACOYAN	3150	2641.67	0.42	-0.16
192	TUZAMAPAN DE GALEANA	1280	1038.33	1.68	-0.19
191	TULCINGO	1962	982	0.31	-0.50
190	TOTOLTEPEC DE GUERRERO	470	321.17	0.43	-0.32
189	TOCHTEPEC	686	386.83	0.28	-0.44
188	TOCHIMILCO	2537.67	2428	2.23	-0.04
187	TLAXCO	589.83	575.33	1.32	-0.02

Tabla 5.4.1 Información de la SAGARPA del cultivo de maíz por municipio del estado de Puebla, para los años 2000-2008.

Número de municipio	Nombre	Promedio de área sembrada	Promedio de área cosechada	Rendimiento [Ton/Ha]	Porcentaje del área siniestrada
186	TLATLAUQUITEPEC	4600	3381.67	1.68	-0.26
185	TLAPANALA	1104.17	925	1.33	-0.16
184	TLAPACOYA	650	626.95	1.32	-0.04
183	TLAOLA	1138.83	1119.57	1.36	-0.02
182	TLANEPANTLA	319.83	187.33	0.29	-0.41
181	TLALTENANGO	1800	1725	2.64	-0.04
180	TLAHUAPAN	9800	8903.33	2.93	-0.09
179	TLACUILOTEPEC	1335.17	1261	1.35	-0.06
178	TLACOTEPEC DE BENITO JUAREZ	4784.17	2055.33	0.37	-0.57
177	TLACHICHUCA	14776.67	10856.5	2.6	-0.27
176	TILAPA	152.33	147.87	1.45	-0.03
175	TIANGUISMANALCO	1627.33	1444	1.68	-0.11
174	TEZIUTLAN	1008.33	886.98	1.6	-0.12
173	TETELES DE AVILA CASTILLO	641.67	564.91	1.53	-0.12
172	TETELA DE OCAMPO	2560.58	1929.25	1.29	-0.25
171	TEPEYAHUALCO DE CUAUHTEMOC	135.67	84.33	0.31	-0.38
170	TEPEYAHUALCO	10033.33	8317.36	2.2	-0.17
169	TEPEXI DE RODRIGUEZ	7352.33	5969	0.52	-0.19
168	TEPEXCO	1581.17	1581.17	1.58	0.00
167	TEPETZINTLA	954.32	658.53	1.21	-0.31
166	TEPEOJUMA	765.5	507.5	0.7	-0.34
165	TEPEMAXALCO	500	416.67	1.25	-0.17
164	TEPEACA	6500	5762.5	2.55	-0.11
163	TEPATLAXCO DE HIDALGO	2500	2083.33	2.53	-0.17
162	TEPANGO DE RODRIGUEZ	187.8	171.13	1.22	-0.09
161	TEPANCO DE LOPEZ	1837	798.5	0.32	-0.57
160	TEOTLALCO	1705	1138.33	0.58	-0.33
159	TEOPANTLAN	2003.33	1326.5	0.43	-0.34
158	TENAMPULCO	2731.67	2106.8	1.93	-0.23
157	TEHUITZINGO	3938.79	2179.4	0.24	-0.45
156	TEHUACAN	1560	824.5	0.21	-0.47
155	TECOMATLAN	2376	1190.17	0.31	-0.50
155	TECOMATLAN	2376	1190.17	0.31	-0.50
154	TECAMACHALCO	3580.33	1948.33	0.24	-0.46

Tabla 5.4.1 Información de la SAGARPA del cultivo de maíz por municipio del estado de Puebla, para los años 2000-2008.

Número de municipio	Nombre	Promedio de área sembrada	Promedio de área cosechada	Rendimiento [Ton/Ha]	Porcentaje del área siniestrada
153	TECALI DE HERRERA	3000	2500	1.27	-0.17
152	SOLTEPEC	5491.67	4892.5	2.58	-0.11
151	SANTO TOMAS HUEYOTLIPAN	593.33	406	0.45	-0.32
150	HUEHUETLAN EL GRANDE	1792.17	1185	0.47	-0.34
149	SANTIAGO MIAHUATLAN	1650	934.5	0.22	-0.43
148	SANTA ISABEL CHOLULA	786.67	640.83	1.97	-0.19
147	SANTA INES AHUATEMPAN	3119.5	2586.17	0.53	-0.17
146	SANTA CATARINA TLALTEMPAN	126	93.5	0.32	-0.26
145	SAN SEBASTIAN TLACOTEPEC	3133	2966	0.64	-0.05
144	SAN SALVADOR HUIXCOLOTLA	843.17	591.17	0.44	-0.30
143	SAN SALVADOR EL VERDE	4500	4483.33	2.49	0.00
142	SAN SALVADOR EL SECO	8236.67	7356.67	2.67	-0.11
141	SAN PEDRO YELOIXTLAHUACA	986.83	664.75	0.58	-0.33
140	SAN PEDRO CHOLULA	4564	4230.67	2.78	-0.07
139	SAN PABLO ANICANO	877.33	591.33	0.47	-0.33
138	SAN NICOLAS DE LOS RANCHOS	1350	1266.67	1.46	-0.06
137	SAN NICOLAS BUENOS AIRES	4103.33	3070.92	2.39	-0.25
136	SAN MIGUEL XOXTLA	450	433.33	2.04	-0.04
135	SAN MIGUEL IXITLAN	1003.33	683.67	0.48	-0.32
134	SAN MATIAS TLALANCALECA	2800	2603.33	2.8	-0.07
133	SAN MARTIN TOTOLTEPEC	428.5	276.33	0.53	-0.36
132	SAN MARTIN TEXMELUCAN	3000	2833.33	2.54	-0.06
131	SAN JUAN ATZOMPA	227.5	172.83	0.33	-0.24

Tabla 5.4.1 Información de la SAGARPA del cultivo de maíz por municipio del estado de Puebla, para los años 2000-2008.

Número de municipio	Nombre	Promedio de área sembrada	Promedio de área cosechada	Rendimiento [Ton/Ha]	Porcentaje del área siniestrada
130	SAN JUAN ATENCO	2513.33	2117.42	2.42	-0.16
129	SAN JOSE MIAHUATLAN	350	263	0.49	-0.25
128	SAN JOSE CHIAPA	2966.67	2508.83	2.42	-0.15
127	SAN JERONIMO XAYACATLAN	910.83	621.92	0.46	-0.32
126	SAN JERONIMO TECUANIPAN	1350	1250	2.17	-0.07
125	SAN GREGORIO ATZOMPA	366.67	292.5	1.83	-0.20
124	SAN GABRIEL CHILAC	48.33	29.5	0.34	-0.39
123	SAN FELIPE TEPATLAN	304	304	1.24	0.00
122	SAN FELIPE TEOTLALCINGO	1400	1366.67	1.71	-0.02
121	SAN DIEGO LA MESA TOCHIMILTZINGO	449.83	300.33	0.45	-0.33
120	SAN ANTONIO CAÑADA	178	100.67	0.57	-0.43
119	SAN ANDRES CHOLULA	1200	1150	2.08	-0.04
118	REYES DE JUAREZ LOS	962.83	620.17	0.81	-0.36
117	RAFAEL LARA GRAJALES	560.83	547.5	2.5	-0.02
116	QUIMIXTLAN	1476.26	1427.78	1.53	-0.03
115	QUECHOLAC	2936.67	2067.83	0.9	-0.30
114	PUEBLA	6727.5	5058.69	1.69	-0.25
113	PIAXTLA	2097.83	1174.83	0.24	-0.44
112	PETLALCINGO	5092.83	3480.5	0.57	-0.32
111	PANTEPEC	2181.33	2119.67	1.37	-0.03
110	PALMAR DE BRAVO	11218.33	8932.5	0.93	-0.20
109	PAHUATLAN	419.33	393.4	1.29	-0.06
108	ORIENTAL	3983.33	3141.5	1.92	-0.21
107	OLINTLA	2088.33	1369.3	1.78	-0.34
106	OCOYUCAN	416.67	333.33	1.5	-0.20
105	OCOTEPEC	814.33	814.33	2.5	0.00
104	NOPALUCAN	5733.33	5120.5	2.45	-0.11
103	NICOLAS BRAVO	950	628.67	0.48	-0.34

Tabla 5.4.1 Información de la SAGARPA del cultivo de maíz por municipio del estado de Puebla, para los años 2000-2008.

Número de municipio	Nombre	Promedio de área sembrada	Promedio de área cosechada	Rendimiento [Ton/Ha]	Porcentaje del área siniestrada
102	NEALTICAN	2500	2300	2.22	-0.08
101	NAUZONTLA	859.67	843.5	1.69	-0.02
100	NAUPAN	1081.83	1016.38	1.24	-0.06
99	MORELOS CAÑADA	4182.5	2540.97	1.98	-0.39
98	MOLCAXAC	2475.67	1338.5	0.33	-0.46
97	MIXTLA	487.83	361.83	0.33	-0.26
96	MAZAPILTEPEC DE JUAREZ	965	772.17	2.58	-0.20
95	MAGDALENA TLATLAQUITEPEC LA	203.33	156.67	0.3	-0.23
94	LIBRES	5275	4287	2.25	-0.19
93	SALTILLO LA FRAGUA	3570	1865.35	1.56	-0.48
92	JUAN N. MENDEZ	2289.67	1399.17	0.27	-0.39
91	JUAN GALINDO	92	90.87	1.26	-0.01
90	JUAN C BONILLA	2000	1850	2.77	-0.08
89	JOPALA	1679.5	1612.59	1.29	-0.04
88	JONOTLA	1158.33	891.67	1.73	-0.23
87	JOLALPAN	4715.83	3663.33	0.63	-0.22
86	JALPAN	865.83	792.9	1.56	-0.08
85	IZUCAR DE MATAMOROS	4578.17	3033.67	0.5	-0.34
84	IXTEPEC	1318.33	989.83	1.69	-0.25
83	IXTACAMAXTITLAN	9381	6616.23	1.27	-0.29
82	IXCAQUIXTLA	1955.83	1393.33	0.64	-0.29
81	IXCAMILPA DE GUERRERO	2630.67	1742.67	0.57	-0.34
80	ATLEQUIZAYAN	1166.67	848.67	1.3	-0.27
79	HUITZILTEPEC	920	604.5	0.29	-0.34
78	HUITZILAN DE SERDAN	1741.67	1655.41	1.7	-0.05
77	HUEYTLALPAN	1775	1358.21	1.65	-0.23
76	HUEYTAMALCO	2343.33	2176.67	1.88	-0.07
75	HUEYAPAN	932.5	757.7	1.78	-0.19
74	HUEJOTZINGO	3723	3509.67	3.37	-0.06
73	HUEHUETLAN EL CHICO	2783.33	2138	0.63	-0.23

Tabla 5.4.1 Información de la SAGARPA del cultivo de maíz por municipio del estado de Puebla, para los años 2000-2008.

Número de municipio	Nombre	Promedio de área sembrada	Promedio de área cosechada	Rendimiento [Ton/Ha]	Porcentaje del área siniestrada
73	HUEHUETLAN EL CHICO	2783.33	2138	0.63	-0.23
72	HUEHUETLA	2175	1447.25	1.73	-0.33
72	HUEHUETLA	2175	1447.25	1.73	-0.33
71	HUAUCHINANGO	2357.33	2106.33	1.42	-0.11
70	HUATLATLAUCA	2789	1985.67	0.32	-0.29
69	HUAQUECHULA	1585.33	1286.67	1.27	-0.19
68	HERMENEGILDO GALEANA	449.33	428.63	1.31	-0.05
67	GUADALUPE VICTORIA	4550	2405.1	1.97	-0.47
66	GUADALUPE	5039.5	3501	0.56	-0.31
65	GENERAL FELIPE ANGELES	4820.67	3786.67	0.93	-0.21
64	FRANCISCO Z. MENA	2142.5	2050.79	1.36	-0.04
63	ESPERANZA	3464.17	2946.81	2.58	-0.15
62	EPATLAN	865.67	574.33	0.52	-0.34
61	ELOXOCHITLAN	4515.83	4104	0.65	-0.09
60	DOMINGO ARENAS	900	850	2.41	-0.06
59	CHINANTLA	1088.67	789.33	0.41	-0.27
58	CHILCHOTLA	3746.83	3297.15	1.99	-0.12
57	CHILA HONEY	2677.67	2467.64	1.61	-0.08
56	CHILA DE LA SAL	1247	562.5	0.31	-0.55
55	CHILA	2071	1563.5	0.97	-0.25
54	CHIGNAUTLA	3816	3441.65	1.38	-0.10
53	CHIGNAHUAPAN	9394	4871.53	1.09	-0.48
52	CHIGMECATITLAN	679.33	80.83	0.28	-0.88
51	CHIETLA	2983.33	2400.5	0.84	-0.20
50	CHICONCUAUTLA	1126.17	887.58	1.23	-0.21
49	CHICHIQUILA	1761.67	1703.33	2.04	-0.03
48	CHIAUTZINGO	2047.5	910.17	2.27	-0.56
47	CHIAUTLA DE TAPIA	7024.5	6307.83	0.6	-0.10
47	CHIAUTLA DE TAPIA	7024.5	6307.83	0.6	-0.10
46	CHAPULCO	3017.5	2734	0.51	-0.09
45	CHALCHICOMULA DE SESMA	11623.33	9651.03	2.76	-0.17
44	CUYOACO	3785	3401.99	2.18	-0.10

Tabla 5.4.1 Información de la SAGARPA del cultivo de maíz por municipio del estado de Puebla, para los años 2000-2008.

Número de municipio	Nombre	Promedio de área sembrada	Promedio de área cosechada	Rendimiento [Ton/Ha]	Porcentaje del área siniestrada
43	CUETZALAN DEL PROGRESO	4140.83	3700	1.68	-0.11
42	CUAYUCA DE ANDRADE	2927	1758.67	0.28	-0.40
41	CUAUTLANCINGO	2500	2316.67	2.68	-0.07
40	CUAUTINCHAN	3993.33	3330	0.67	-0.17
39	CUAUTEMPAN	1253.5	929.87	1.25	-0.26
38	CUAPIAXTLA DE MADERO	378.17	251.92	0.5	-0.33
37	COYOTEPEC	1783.33	1375	0.61	-0.23
36	COYOMEAPAN	3505	3060.5	0.57	-0.13
35	COXCATLAN	2314	2003.67	0.88	-0.13
34	CORONANGO	1950	1783.39	3.19	-0.09
33	COHUECAN	832.5	680.83	1.27	-0.18
32	COHETZALA	1138	659.17	0.48	-0.42
31	COATZINGO	641.83	512.67	0.72	-0.20
30	COATEPEC	252.1	158.77	1.06	-0.37
29	CAXHUACAN	809.33	694.33	1.55	-0.14
28	CAMOCUAUTLA	723.95	489.78	1.06	-0.32
27	CALTEPEC	2575	1608.33	0.58	-0.38
27	CALTEPEC	2575	1608.33	0.58	-0.38
26	CALPAN	2410.83	2183.33	2.05	-0.09
25	AYOTOXCO DE GUERRERO	1590	1440.73	1.41	-0.09
24	AXUTLA	1069.5	909.5	0.64	-0.15
23	ATZITZINTLA	2869.67	2352.42	2.47	-0.18
22	ATZITZIHUACAN	1722.5	1716.67	1.46	0.00
21	ATZALA	0	0	0	0.00
20	ATOYATEMPAN	734.5	685.83	0.45	-0.07
19	ATLIXCO	3401.67	2819.17	1.83	-0.17
18	ATEXCAL	1921.67	1221.67	0.75	-0.36
17	ATEMPAN	1585.17	1499.38	1.44	-0.05
16	AQUIXTLA	4292.08	3584.24	1.53	-0.16
15	AMOZOC	4313.33	3637.5	2.77	-0.16
14	AMIXTLAN	706.58	565.58	1.16	-0.20
13	ALTEPEXI	0	0	0	0.00
12	ALJOJUCA	5449.5	4885.25	2.54	-0.10

Tabla 5.4.1 Información de la SAGARPA del cultivo de maíz por municipio del estado de Puebla, para los años 2000-2008.

Número de municipio	Nombre	Promedio de área sembrada	Promedio de área cosechada	Rendimiento [Ton/Ha]	Porcentaje del área siniestrada
11	ALBINO ZERTUCHE	759.83	420.28	0.37	-0.45
10	AJALPAN	5723.33	4439.42	0.45	-0.22
9	AHUEHUITLA	969.5	451.5	0.22	-0.53
8	AHUAZOTEPEC	1244	1122.88	1.68	-0.10
7	AHUATLAN	1433	953.67	0.48	-0.33
6	AHUACATLAN	1037.42	919.08	1.28	-0.11
5	ACTEOPAN	606.67	606.67	1.58	0.00
4	ACATZINGO	3761.83	2941.33	1.05	-0.22
3	ACATLAN	4417.67	3044.03	0.45	-0.31
3	ACATLAN	4417.67	3044.03	0.45	-0.31
2	ACATENO	1848.33	1681.67	1.88	-0.09
1	ACAJETE	10480	10071.91	3.1	-0.04
	total	534567	450739.96	-3812.35	

Fuente: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera SIAP (SAGARPA 2000-2008)

## Referencias

- Cassel-Gintz, M. A., M. K. B. Ludeke, et al. (1997). "Fuzzy logic based global assessment of marginality of agricultural land use." Climate research **8**: 135-150.
- Castañeda, P. R. (1990). El maíz y su cultiv. México, Ed. Agt. Editor, S.A.
- CGIAR-CSI (2008). Modelo digital de elevación, a partir de los datos del Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) con resolución espacial de 90 m., Consortium for Spatial Information - Consultative Group for International Agriculture Research.
- Chiu, S. L. (1994). "Fuzzy Model Identification Based on Cluster Estimation." Journal of Intelligent & Fuzzy Systems **2**(3): 267-278.
- CICC, C. I. d. C. C. (2009). "México. Cuarta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático."
- Conde, C., B. Martínez, O. Sánchez, F. Estrada, A. Fernandez, J. Zavala, C. Gay (2008) Escenarios de Cambio Climático (2030 y 2050) para México y Centro América . Temperatura y Precipitación.
- Conde, C., R. M. Ferrer, et al. (1999). Estudio de la vulnerabilidad de la agricultura de maíz de temporal mediante el modelo Ceres - Maize. México: Una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. C. Gay. Mexico.
- Conde, C., R. M. Ferrer, et al. (2000). Estudio de la vulnerabilidad de la agricultura de maíz de temporal mediante el modelo ceres-maize. México: una vision hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. C. G. García. Mexico, Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, US Country Studies Program: p220.
- Conde, C., C. Gay García, et al. (2008). Guía para la Generación de Escenarios de Cambio Climático a Escala Regional, Centro de Ciencias de la Atmósfera.
- Conde, C., B. Martínez, et al. (2008) Escenarios de Cambio Climático (2030 y 2050) para México y Centro América . Temperatura y Precipitación.
- Delworth, T. and e. al. (2006). "GFDL's CM2 global coupled climate models – Part 1: Formulation and simulation characteristics." J. Climate **19**: 643-674.
- Dubois, D. and H. Prade (1980). Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications. New York, Academic Press.
- Escobedo, F. (1988). Panorámica General de la Agricultura de Temporal en México. CEICADAR 1. Puebla, México, Colegio de Postgraduados.

ESRI (2006). Environmental Systems Research Institute, Inc. Redlands, CA. 92373. USA.

Essery, R., M. Best, et al. (2001). *MOSES 2.2 Technical Documentation*. Hadley Centre Technical Note. Exeter, UK, Hadley Centre for Climate Prediction and Research, UK Met Office. **30**.

FAO (1976). "A framework for land evaluation." Soil resources development and conservation service land and water development division. from <http://www.fao.org/docrep/x5310e/x5310e04.htm>.

FAO (1994). ECOCROP 1. The adaptability level of the FAO crop environmental requirements database. A. FAO. Rome, Italy, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

Feigenbaum, E. A. and B. G. Buchanan (1993). "DENDRAL and Meta-DENDRAL: Roots of Knowledge Systems and Expert System Applications." Artificial Intelligence **59**: 233-240.

Fernandez-Eguiarte, A., J. Zavala-Hidalgo, et al. (2010). Atlas Climático Digital de México. Centro de Ciencias de la Atmósfera UNAM.

Flores, M., R. Araujo, et al. (1999). Vulnerabilidad de las zonas potencialmente aptas para maíz de temporal en México ante el cambio climático. México: Una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. C. Gay. Mexico.

Flores, M., R. Araujo, et al. (1999). Vulnerabilidad de las zonas potencialmente aptas para maíz de temporal en México ante el cambio climático. México: Una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. C. Gay. Mexico.

GFDL-GAMDT (2004). "The new GFDL global atmosphere and land model AM2- LM2: Evaluation with prescribed SST simulations." J. Climate **17**: 4641-4673.

Gnanadesikan, A. and e. al. (2004). " GFDL's CM2 global coupled climate models-Part 2: The baseline ocean simulation." J. Climate **19**: 675-697.

Gómez, J. C. and M. Esquivel (2002). "Agroclimatología del maíz de México." Revista Geográfica(132 Jul-Dic): 127.

Hagemann, S. (2002). *An Improved Land Surface Parameter Dataset for Global and Regional Climate Models*. M. f. Meteorology. Hamburg, Germany, Max Planck Institute for Meteorology. **162**: 21.

Hagemann, S. and L. Dümenil-Gates (2001). "Validation of the hydrological cycle of ECMWF and NCEP reanalyses using the MPI hydrological discharge model." J. Geophysical Research **106**: 1503-1510.

- Hibler, W. D. (1979). "A dynamic thermodynamic sea ice model." J. Physical Oceanography **9**: 817-846.
- Hijmans, R. J., S. E. Cameron, et al. (2005). "Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas." International Journal of Climatology **25**: 1965-1978.
- INE and SEMARNAT (2006). Sector agricultura. Tercera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. I. N. d. E. S. d. M. A. y. R. Naturales. Mexico.
- INEGI (1998). Suelos dominantes en la República Mexicana. Mexico, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI (2000). Modelos Digitales de Elevación. 122 cartas. México, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI (2005). Uso del Suelo y Vegetación.
- IPCC-TGICA (2007). General Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment. Version 2., Task Group on Data Scenario Support for Impact and Climate Assessment.
- IPCC-WG1 (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., Cambridge University Press.
- IPCC-WGI (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., Cambridge University Press.
- IPCC-WGII (2007). **Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press.
- Johns, T. C. and et al. (2006). "The new Hadley Centre climate model HadGEM1: Evaluation of coupled simulations." J. Climate **19**: 1327-1353.
- Jones, C. A. and J. R. Kiniry (1986). CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development. Texas, A&M Press, College Station.
- Jungclaus, J. H. and e. al. (2006). "Ocean circulation and tropical variability in the AOGCM ECHAM5/MPI-OM." J. Climate **19**: 3952-3972.
- Klir, G. J. and B. Yuan (1995). Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications. Upper Saddle Rver, Prentice Hall.
- Leemans, R. and G. J. Van Den Born (1994). "Determining the potencial distribution of vegetation crops and agricultural productivity." Water, Air & Soil pollution. An international journal of environmental pollution. **76**: 133-161.

- Lipscomb, W. H. (2001). "Remapping the thickness distribution in sea ice models." J. Geophysical Research **106**: 13989-14000.
- Mamdani, E. H. and S. Assilian (1975). "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller." International Journal of Man-Machine Studies **7**(1): 1-13.
- Marsland, S. J. and e. al. (2003). "The Max-Planck-Institute global ocean/sea ice model with orthogonal curvilinear coordinates." Ocean Modelling **5**: 91-127.
- Martin, G. M. and e. al. (2004). Evaluation of the Atmospheric Performance of HadGAM/GEM1. Hadley Centre Technical Note Exeter, UK, Hadley Centre for Climate Prediction and Research/Met Office. **54**.
- MATLAB (2009). Fuzzy Logic Toolbox. I. The MathWorks.
- MATLAB (2009). MATLAB. Natick, Massachusetts, The MathWorks Inc.
- Milly, P. C. D. and S. A.B. (2002). "Global modeling of land water and energy balances, Part I: The Land Dynamics (LaD) model." J. Hydrometeorol. **3**: 283-299.
- Minsky, M. (1975). A framework for representing knowledge., McGraw Hill.
- Monterroso, A. I., C. Conde, et al. (2009). "Assessing current and potential rainfed maize suitability under climate change scenarios in México." Atmósfera **24**(1): 53-57.
- Monterroso, A. I., G. Rosales, et al. (2006). México. Tercera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. México.
- Nadal, A. and T. A. Wise (2004). Los costos ambientales de la liberalización agrícola: El comercio de maíz entre México y EE.UU. en el marco del NAFTA. Globalización y medio ambiente: Lecciones desde las Américas.
- Nakicenovic, N. and J. Alcamo (2000). Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, U.K., Cambridge University Press.
- Oki, T. and Y. C. Sud (1998). "Design of total runoff integrating pathways (TRIP)—A global river channel network." Earth Interactions **2**: 1-37.
- Otriz-Solório, C. A. (1987). Elementos de agrometeorología cuantitativa con aplicaciones para la República Mexicana. México, Universidad Autónoma Chapingo.
- Pérez Pueyo, R. (2005). Procesado y Optimización de Espectros Raman mediante Técnicas de Lógica Difusa: Aplicación a la identificación de Materiales Pictóricos. TEORIA DEL SENYAL I COMUNICACIONS. Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya.

Prakash, T. N. (2003). Land Suitability Analysis for Agricultural Crops: A Fuzzy Multicriteria Decision Making Approach. Science in Geoinformatics. Enshede, Netherlands, International Institute for Geo-information Science and Earth Observation. **Master of Science in Geoinformatics**.

Quillian, R. and M. Minsky (1968). Semantic Memory., MIT Press.

Roberts, M. J. (2004). *The Ocean Component of HadGEM1*. GMR Report Annex IV.D.3. Exeter, UK., Met Office.

Roeckner, E. and e. al. (2003). *The Atmospheric General Circulation Model ECHAM5. Part I: Model Description*. MPI report. Hamburg, Germany, Max Planck Institute for Meteorology. **349**: 127.

Röhrig, J. (2008). Evaluation of agricultural land resources in Benin by regionalisation of the marginality index using satellite data. Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät. Bonn, Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn. **Doctorado**.

SAGARPA, S. (2000-2008). Producción anual de maíz del estado de Puebla.

Sánchez, S. L. (1983). Comunicación personal. Morelia, Michoacan.

SEMARNAT (2008). Informe de la situación del medio ambiente en México. México.

Semtner, A. J. (1976). " A model for the thermodynamic growth of sea ice in numerical investigations of climate." J. Physical Oceanography **6**: 379-389.

SEP (1983). Manuales para la Investigación Agropecuaria. México, Trillas.

Shepard, R. B. (2005). Quantifying Environmental Impact Assessments Using Fuzzy Logic. New york, Springer Science+Business Media, Inc.

Sicat, R. S., E. J. M. Carranza, et al. (2005). "Fuzzy modeling of farmers' knowledge for land suitability classification " Agricultural systems **83**: 49-75.

Siler, W. and J. J. Buckley (2005). Fuzzy Expert Systems and Fuzzy Reasoning, Wiley-Interscience.

Sugeno, M. (1977). Fuzzy measures and fuzzy integrals: a survey. North-Holland, NY.

Swart, R., J. Mitchell, et al. (2002). "Stabilisation scenarios for climate impact assessment." Global Environmental Change **12**: 155-165.

Sys, C., E. V. Ranst, et al. (1991). Land Evaluation Part I. Principles in land evaluation and crop production calculations. Brussels, Belgium, General administration for development cooperation.

UCAR (2007). MAGICC/SCENGEN. Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change/ A Regional Climate SCENario GENerator. University Corporation for Atmospheric Research. United States.

Viveros Flores, C. E. (2010). Estudio de la Dinámica de Aprovechamiento del Maíz en las Unidades de Producción Familiar en el Valle de Puebla, México. Postgrado de estrategias para el desarrollo agrícola regional. Puebla, Colegio de Postgraduados. **PhD:** 119.

Wilsie, C. (1956). Cultivos, aclimatación y distribución. Zaragoza, España, Acribia.

Winton, M. (2000). "A reformulated three-layer sea ice model." J. Atmos. Ocean. Technol **17**(4): 525-531.

Zadeh, L. A. (1965). "Fuzzy sets." Informatio and Control **8**: 338-353.

# Índice de Tablas

<b>Tabla</b>	<b>Página</b>
Tabla 1.2.1 Categorías de aptitud de FAO. (FAO 1976)	2
Tabla 1.3.1.1 Datos de los tres modelos utilizados, (IPCC-WGI 2007)	8
Tabla 1.4.1 Rango de los límites de tolerancia. (Wilsie 1956)	9
Tabla 1.4.2 Requerimiento de temperatura en el ciclo fenológico del maíz. Centro de investigación agrícola. Morelia, Mich. INIA,SARH,(Sánchez 1983).	9
Tabla 1.4.3 Requerimiento de precipitación en el ciclo fenológico del maíz. (SEP 1983)	10
Tabla 1.4.4 Requerimientos agroclimáticos para el maíz criollo y de temporal en México. Fuente:Monterroso et. al. (2009)	12
Tabla 1.5.1 Comparación de entre la lógica clásica y la difusa acerca del intervalo de temperaturas aptas.	16
Tabla 1.5.4.1 Comparación de los métodos de inferencia difusa. (MATLAB 2009)	23
Tabla 2.2.1 Requerimientos climáticos para el maíz de temporal modificada con base a (Flores et al. 1999)	26
Tabla 2.2.2 Requerimientos climáticos para el maíz criollo y de temporal en México. (Monterroso et al. 2009)	27
Tabla 2.2.3 Requerimientos agroclimáticos para el maíz criollo y de temporal en México en conjuntos difusos.	27
Tabla 2.3.1 Requerimientos agroclimáticos para el maíz criollo y de temporal en México en conjuntos difusos.	31
Tabla 3.1.1 Porcentaje de las áreas con distintas aptitudes del mapa base.	40
Tabla 3.2.1 Porcentaje de las áreas con distintas aptitudes del mapa base.	46
Tabla 3.2.2 Porcentaje del área usada por agricultura temporal de las distintas aptitudes del mapa base.	48
Tabla 3.2.1.1 Porcentaje de cambio de las áreas con distintas aptitudes con respecto al mapa base para los escenarios ECHAM del 2050.	48
Tabla 3.2.2.1 Porcentaje de cambio de las áreas con distintas aptitudes con respecto al mapa base para los escenarios GDFL del 2050.	49
Tabla 3.2.3.1 Porcentaje de cambio de las áreas con distintas aptitudes con respecto al mapa base para los escenarios HADLEY del 2050.	51

<b>Tabla</b>	<b>Página</b>
Tabla 3.4.1 Porcentaje de las áreas con distintas aptitudes del mapa base de Puebla.	53
Tabla 3.4.1.1 Porcentaje de cambio de las áreas con distintas aptitudes con respecto al mapa base de Puebla para los escenarios ECHAM del 2050.	54
Tabla 3.4.2.1 Porcentaje de cambio de las áreas con distintas aptitudes con respecto al mapa base de Puebla para los escenarios GDFL del 2050.	56
Tabla 3.4.3.1 Porcentaje de cambio de las áreas con distintas aptitudes con respecto al mapa base de Puebla para los escenarios HADLEY del 2050.	57
Tabla 3.4.4.1 Porcentaje de las áreas de distintas aptitudes utilizadas en la agricultura temporal en Puebla.	59
Tabla 4.1 Comparación de los porcentajes de cobertura de las aptitudes de los distintos trabajos	61
Tabla 4.2 Comparación de los resultados del (%) de la superficie Nacional de acuerdo al nivel de aptitud para el cultivo de maíz. Las primeras 7 columnas son resultados de Monterroso et. al 2009. Entre paréntesis el muestra el signo de cambio.	62
Tabla 5.1.1 Porcentajes de las distintas áreas para los distintos escenarios usando las variables de temperatura y precipitación.	64
Tabla 5.2.1 Porcentajes de las distintas áreas para los distintos escenarios.	68
Tabla 5.2.1.1 Porcentaje de cambio de las áreas con distintas aptitudes con respecto al mapa base para los escenarios ECHAM del 2030.	69
Tabla 5.2.2.1 Porcentaje de cambio de las áreas con distintas aptitudes con respecto al mapa base para los escenarios GDFL del 2030.	70
Tabla 5.2.3.1 Porcentaje de cambio de las áreas con distintas aptitudes con respecto al mapa base para los escenarios HADLEY del 2030.	71
Tabla 5.3.1 Porcentajes de las distintas áreas para los distintos escenarios para el estado de Puebla.	72
Tabla 5.3.1.1 Porcentaje de cambio de las áreas con distintas aptitudes con respecto al mapa base de Puebla para los escenarios ECHAM del 2030.	73
Tabla 5.3.2.1 Porcentaje de cambio de las áreas con distintas aptitudes con respecto al mapa base de Puebla para los escenarios GDFL del 2030.	74
Tabla 5.3.3.1 Porcentaje de cambio de las áreas con distintas aptitudes con respecto al mapa base de Puebla para los escenarios HADLEY del 2030.	75
Tabla 5.4.1 Información de la SAGARPA del cultivo de maíz por municipio del estado de Puebla, para los años 2000-2008.	81

# Índice de Figuras

Figura	Página
Figura 1.2.2 Estructura de la clasificación de categorías de aptitud de FAO. (FAO 1976)	3
Figura 1.3.1.1 Características de la resolución geográfica de las distintas generaciones de modelo utilizados en los reportes del IPCC: FAR (IPCC, 1990), SAR (IPCC, 1996), TAR (IPCC, 2001a), y AR4 (2007). No se muestra la resolución vertical pero es comparable a la resolución horizontal de los modelos. (IPCC-WG1 2007)	6
Figura 1.4.1 Escenario base de las áreas potenciales para la producción de maíz. (Flores et al. 1999)	10
Figura 1.4.2 Áreas de producción de maíz de temporal vulnerables al cambio climático usando el Modelo GFDL-R30. (Flores et al. 1999)	11
Figura 1.4.3 Áreas de producción de maíz de temporal vulnerables al cambio climático usando el Modelo CCC. (Flores et al. 1999)	11
Figura 1.4.4 Mapa base de la tercera comunicación con la climatología 1960-1990.(Monterroso Rivas et al. 2006)	13
Figura 1.4.5 Aptitud para maíz temporal bajo escenarios A2 de cambio climático para el año 2050. a) GFDL B) ECHAM y c) HADLEY. (Monterroso Rivas et al. 2006)	13
Figura 1.4.6 Escenario base con la climatología 1950-2000, escenarios al 2050 A2, GDFL, ECHAM, HADLEY. (Monterroso Rivas et al. 2009)	14
Figura 1.5.1 Conjunto de temperaturas.	15
Figura 1.5.2 Conjunto difuso del intervalo de temperaturas aptas.	15
Figura 1.5.3 Comparación gráfica entre la lógica clásica y la difusa comparando la evaluación del intervalo de temperaturas aptas.	17
Figura 1.5.4 Pasos a seguir en la programación difusa.	17
Figura 1.5.1.1 Función de membresía triangular (izq.) y trapezoidal (der.) (MATLAB 2009)	18
Figura 1.5.1.2 Función de membresía gaussiana. (MATLAB 2009)	19
Figura 1.5.1.3 Función de membresía sigmoidales. (MATLAB 2009)	20
Figura 1.5.3.1 Tablas estándar de verdad. (MATLAB 2009)	21
Figura 1.5.3.2 Tablas difusas de verdad. (MATLAB 2009)	21

Figura 1.5.3.3 Gráficas de las tablas de verdad clásica y difusa. (MATLAB 2009)	22
Figura 2.2.1 Modelo difuso para medir la aptitud del maíz temporal solo con las variables climáticas.	28
Figura 2.2.2 Funciones de membresía de la variable de temperatura.	28
Figura 2.2.3 Funciones de membresía de la variable de precipitación.	29
Figura 2.2.4 Funciones de membresía de la variable de salida, Aptitud.	30
Figura 2.2.5 Superficie de las reglas entre temperatura y precipitación.	30
Figura 2.3.1 Modelo difuso para medir la aptitud del maíz temporal.	31
Figura 2.3.2 Funciones de membresía de la variable de temperatura.	32
Figura 2.3.3 Funciones de membresía de la variable de precipitación.	32
Figura 2.3.4 Funciones de membresía de la variable de pendiente.	32
Figura 2.3.5 Funciones de membresía de la variable de profundidad.	33
Figura 2.3.6 Funciones de membresía de la variable de salida, Aptitud.	33
Figura 2.3.7 Superficie de las reglas entre temperatura y precipitación.	33
Figura 2.3.8 Superficie de las reglas entre temperatura y la pendiente.	34
Figura 2.3.9 Superficie de las reglas entre temperatura y la profundidad de suelos.	35
Figura 2.3.10 Superficie de las reglas entre precipitación y la pendiente.	36
Figura 2.3.11 Superficie de las reglas entre precipitación y la profundidad de suelos.	36
Figura 2.3.12 Superficie de las reglas entre la pendiente y la profundidad de suelos.	35
Figura 3.1 Gráficas de los escenarios de temperatura y precipitación hasta el horizonte 2050. Notación MPI ECHAM 05 (E), GDFL CM 2.0 (G) y UKHAGEM1 (H), escenarios de emisiones (a1, a2, b1, b2).	38
Figura 3.1.1 Mapa base de aptitud con temperatura y precipitación.	39
Figura 3.1.2 Mapa base de aptitud con temperatura y precipitación clasificado	39
Figura 3.1.1.1 Mapas de aptitud con temperatura y precipitación para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo ECHAM para el horizonte 2050.	40

Figura 3.1.1.2 Mapas de diferencia de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo ECHAM para el horizonte 2050 con respecto al escenario base.	41
Figura 3.1.2.1 Mapas de aptitud con temperatura y precipitación para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo GDFL para el horizonte 2050.	42
Figura 3.1.2.2 Mapas de diferencia de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo GDFL para el horizonte 2050 con respecto al escenario base.	42
Figura 3.1.3.1 Mapas de aptitud con temperatura y precipitación para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo HADLEY para el horizonte 2050.	43
Figura 3.1.3.2 Mapas de diferencia de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo HADLEY para el horizonte 2050 con respecto al escenario base.	44
Figura 3.2.1 Mapa base de aptitud del maíz temporal con las cuatro variables temperatura, precipitación, profundidad de suelos y pendientes	45
Figura 3.2.2 Mapa base de aptitud del maíz temporal con las cuatro variables temperatura, precipitación, profundidad de suelos y pendientes clasificado	46
Figura 3.2.3 Mapa de uso de suelo y vegetación de México (INEGI 2005)	47
Figura 3.2.4 Mapa base de aptitud del maíz temporal con uso de suelo las cuatro variables temperatura, precipitación, profundidad de suelos y pendientes.	47
Figura 3.2.1.1 Mapas de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo ECHAM para el horizonte 2050.	48
Figura 3.2.1.2 Mapas de diferencia de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo ECHAM para el horizonte 2050 con respecto al escenario base.	49
Figura 3.2.2.1 Mapas de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo GDFL para el horizonte 2050.	50
Figura 3.2.2.2 Mapas de diferencia de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo GDFL para el horizonte 2050 con respecto al escenario base.	50
Figura 3.2.3.1 Mapas de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo HADLEY para el horizonte 2050.	51
Figura 3.2.3.2 Mapas de diferencia de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo HADLEY para el horizonte 2050 con respecto al escenario base.	52

Figura 3.4.1 Mapa base de Puebla con las cuatro variables temperatura, precipitación, profundidad de suelos y pendientes	53
Figura 3.4.2 Mapa base de Puebla con las cuatro variables temperatura, precipitación, profundidad de suelos y pendientes clasificado	54
Figura 3.4.1.1 Mapas de aptitud con temperatura y precipitación para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo ECHAM para el horizonte 2050.	55
Figura 3.4.1.2 Mapas de diferencia de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo ECHAM para el horizonte 2050 con respecto al escenario base.	55
Figura 3.4.2.1 Mapas de aptitud con temperatura y precipitación para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo GDFL para el horizonte 2050.	56
Figura 3.4.2.2 Mapas de diferencia de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo GDFL para el horizonte 2050 con respecto al escenario base.	57
Figura 3.4.3.1 Mapas de aptitud con temperatura y precipitación para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo HADLEY para el horizonte 2050.	58
Figura 3.4.3.1 Mapas de diferencia de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo HADLEY para el horizonte 2050 con respecto al escenario base.	59
Figura 3.4.4.1 A la izquierda el mapa de Puebla aptitud base y a la derecha mapa de aptitud base de Puebla con el uso de suelo para la agricultura temporal	59
Figura 5.1.1.1. Mapas de aptitud con temperatura y precipitación para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo ECHAM para el horizonte 2030.	65
Figura 5.1.1.2 Mapas de diferencia de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo ECHAM para el horizonte 2030 con respecto al escenario base.	65
Figura 5.1.2.1 Mapas de aptitud con temperatura y precipitación para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo GDFL para el horizonte 2030.	66
Figura 5.1.2.2 Mapas de diferencia de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo GDFL para el horizonte 2030 con respecto al escenario base.	66
Figura 5.1.3.1 Mapas de aptitud con temperatura y precipitación para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo HADLEY para el horizonte 2030.	67

Figura 5.1.3.2 Mapas de diferencia de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo HADLEY para el horizonte 2030 con respecto al escenario base.	67
Figura 5.2.1.1 Mapas de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo ECHAM para el horizonte 2030.	69
Figura 5.2.1.2 Mapas de diferencia de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo ECHAM para el horizonte 2030 con respecto al escenario base.	69
Figura 5.2.2.1 Mapas de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo GDFL para el horizonte 2030.	70
Figura 5.2.2.2 Mapas de diferencia de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo GDFL para el horizonte 2030 con respecto al escenario base.	70
Figura 5.2.3.1 Mapas de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo HADLEY para el horizonte 2030.	71
Figura 5.2.3.2 Mapas de diferencia de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo HADLEY para el horizonte 2030 con respecto al escenario base.	71
Figura 5.3.1.1 Mapas de aptitud de puebla para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo ECHAM para el horizonte 2030.	73
Figura 5.3.1.2 Mapas de diferencia de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo ECHAM para el horizonte 2030 con respecto al escenario base.	73
Figura 5.3.2.1 Mapas de aptitud con temperatura y precipitación para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo GDFL para el horizonte 2030.	74
Figura 5.3.2.2 Mapas de diferencia de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo GDFL para el horizonte 2030 con respecto al escenario base.	74
Figura 5.3.3.1 Mapas de aptitud con temperatura y precipitación para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo HADLEY para el horizonte 2030.	75
Figura 5.3.3.2 Mapas de diferencia de aptitud para los cuatro escenarios A1, A2, B1 y B2 del modelo HADLEY para el horizonte 2030 con respecto al escenario base.	75
Figura 5.4.1 Mapa de Puebla aptitud promedio en las áreas de uso de suelo de agricultura de temporal por municipio y con el uso de suelo de agricultura de temporal	76

Figura 5.4.2 Mapa izquierda es de rendimiento por hectaria con el uso de suelo de agricultura de temporal de Puebla. Mapa derecho es el porcentaje de áreas siniestradas por municipio con el uso de suelo de agricultura de temporal de Puebla.	77
Figura 5.4.3 Gráfica arriba contiene los datos de entrada al modelo, (Porcentaje de área siniestrada (verde) y Rendimiento(azul)) y la de abajo los datos de salida (Aptitud(rojo)).	78
Figura 5.4.4 El 25% de los datos de salida originales en azul, contra los datos generados por el modelo en verde con el 25% de los datos de entrada.	79
Figura 5.4.5 Superficie generada por las reglas entre la rendimiento y el porcentaje de área siniestrada.	79
Figura 5.4.6 Mapa de municipios del estado de Puebla con el uso de suelo de agricultura de temporal de INEGI en verde.	80